



Javier de Simas Soto

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Caracterização experimental do escoamento em torno de vegetação nas margens de rios

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: João Gouveia Leal, Professor Auxiliar da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Co-orientador: Maria Teresa Santos, Investigadora
Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Nuno da Costa Guerra

Arguente: Professor Doutor Mário Franca

Vogal: Professor Doutor João Gouveia Leal

Vogal: Doutora Maria Teresa Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2013

“Copyright” **Javier de Simas Soto, FCT/UNL e UNL**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A dissertação de mestrado que aqui se apresenta culmina esta etapa do meu percurso académico. Tratando-se de uma dissertação com forte componente experimental, a realização da mesma não seria possível sem a contribuição das instituições envolvidas. Nesse sentido gostaria de agradecer:

Ao Departamento de Hidráulica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela disponibilização de todos os meios necessários à realização desta campanha experimental. A todos os elementos integrantes deste departamento que deram todo o seu apoio sempre que foi necessário.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa e em particular ao meu orientador Prof. João Leal (FCT – UNL) pelo seu conhecimento científico, pela sua disponibilidade, ajuda, compreensão e paciência ao longo de todas as etapas.

Agradeço também, o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT, através do projecto de investigação com a referência PTDC/ECM/099752/2008.

Ao colega e amigo Eng. João Fernandes (LNEC) pela dedicação, apoio, ajuda e pelos seus conselhos práticos que se revelaram fundamentais para a realização deste trabalho.

O meu agradecimento final é dirigido aos meus familiares e amigos que se mostraram sempre presentes ao longo de todo este percurso, sem toda a sua força este desfecho não teria sido possível.

Resumo

Nas últimas décadas tem-se registado um aumento considerável de cheias fluviais. O carácter normalmente devastador das cheias obriga a que se procure entender, controlar ou em último recurso minimizar as consequências deste fenómeno natural.

As cheias fluviais ocorrem quando a capacidade de vazão do leito principal é excedida, passando o escoamento a ser repartido entre o leito principal e os campos marginais. A invasão dos campos marginais, ou leitos de cheia, impõe uma nova configuração transversal ao escoamento. Nesta nova configuração o escoamento no leito principal, normalmente mais fundo e mais rápido, é obrigado a interagir com o escoamento nos leitos de cheia, mais lento e menos profundo. Além disso, os leitos de cheia encontram-se frequentemente cobertos de vegetação rasteira existindo vegetação ripícola nas margens do leito principal. A existência de vegetação tem influência na capacidade de vazão dos rios, dado que interage com o escoamento originando estruturas turbulentas que aumentam a dissipação de energia.

Com o objectivo de caracterizar experimentalmente o escoamento em torno de elementos verticais (que simulam vegetação ripícola), alinhados longitudinalmente na interface entre o leito principal e os leitos de cheias rugosos, realizaram-se ensaios experimentais num canal de secção composta com 10 metros de comprimento e 2 metros de largura. Cinco escoamentos em regime uniforme foram testados para duas configurações diferentes. A primeira, com relva sintética cobrindo a totalidade dos leitos de cheia e arbustos artificiais, formados por um tronco de 6 mm e uma copa esférica de 9 cm de diâmetro, dispostos em linha recta na interface dos leitos. Na segunda configuração manteve-se os troncos retirando-se a copa esférica. Para medir o campo de velocidades nas três alturas relativas foi utilizado um velocímetro doppler acústico.

Os resultados permitem concluir que a vegetação ripícola influencia fortemente a distribuição espacial da velocidade e da tensão de Reynolds horizontal. Observam-se ainda regiões do escoamento onde aquela tensão assume valores positivos e outras onde os valores são negativos, pelo que se conclui que perto dos elementos verticais a tensão anula-se, ou seja, os elementos verticais impedem a transferência de quantidade de movimento entre os escoamentos no leito principal e nos leitos de cheia. As conclusões referidas anteriormente tornam-se ainda mais evidentes quando a vegetação é dotada de folhagem e a altura do escoamento é maior.

Palavras chave: Canal de secção composta; Vegetação ripícola; Capacidade de vazão de rios; Escoamento uniforme.

Abstract

The considerable increase in river floods registered during the last decades and the typically devastating character of these events makes it necessary to investigate, control or minimize in last resort the impact of this natural phenomenon.

Fluvial flooding occurs when the flow capacity of the main riverbed is exceeded and the river flow is divided between the riverbank and adjacent fields. This invasion of the marginal fields or floodplains imposes a new cross-sectional configuration to the river flow. In this new configuration, the main riverbed flow is normally deeper and faster and interacts with the slower and shallower flow in the floodplains. Moreover, floodplains are frequently covered with undergrowth and riparian vegetation in the main riverbed margins. The presence of this vegetation influences the river conveyance since it interacts with the flow increasing energy dissipation by originating vortex structures.

With the purpose of characterizing the river flow around vertical elements -simulating riparian vegetation- longitudinally aligned along the interface between the main riverbed and the coarse floodplains experimental essays were performed in a compound channel with cross-sectional dimensions of 10x2 meters. Five uniform flow tests were performed using an acoustic doppler speedometer to measure the velocity field distribution for three different heights in two different configurations. In the first configuration, synthetic grass and artificial shrubs of 6 mm rods and 90 mm diameter spherical tops covered the whole floodplain surface, while in the second configuration the spherical tops were removed.

Results show that riparian vegetation strongly influences both the spatial velocity distribution as well as the horizontal Reynolds tension. Furthermore, flow regions where this tension value is positive and others where it is negative have been observed indicating that in the vicinity of vertical elements this tension is canceled, i.e. the vertical elements hamper momentum transfer between flows in the main riverbed and floodplains. The above conclusions became even more evident when this type of vegetation is foiled and the flow height is increased.

Key-words:

Compound Channel; Riparian Vegetation; River Conveyance; Uniform Flow

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Simbologia.....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações Gerais.....	1
1.2. Objectivos e organização da dissertação.....	3
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1. Escoamentos em canais de secção composta lisos.....	5
2.2. Escoamentos em canais de secção composta com leitos rugosos	11
2.3. Escoamentos em canais com secção composta com vegetação	14
3. Procedimento e instalação experimental.....	21
3.1. Canal de secção composta.....	21
3.2. Equipamentos de medição e controlo.....	23
3.3. Procedimento experimental.....	26
4. Ensaios e processamento de dados.....	29
4.1. Caracterização dos ensaios.....	29
4.2. Recolha e tratamento de dados.....	31
4.3. Integração dos dados das velocidades e determinação dos valores médios em profundidade	32
5. Caracterização do escoamento em canais de secção composta com elementos verticais na interface	37
5.1. Introdução	37
5.2. Caracterização do escoamento em canais de secção composta com elementos verticais na interface - árvores.....	38

5.3. Caracterização do escoamento em canais de secção composta com elementos verticais na interface - troncos	50
5.4. Influência do tipo de elemento vertical e da altura relativa.....	58
6. Conclusões e propostas para futuros desenvolvimentos	63
6.1. Conclusões	63
6.2. Propostas para futuros desenvolvimentos	65
Bibliografia	67

Simbologia

Siglas

ADV Acoustic Doppler Velocimeter

Símbolos

A	Constante logarítmica
Fr	Número de Froude
H	Altura de água
Keq	Coefficiente de rugosidade equivalente
LC	Leito de cheia
LP	Leito principal
Pa	Pascal
Q	Caudal
Qc	Caudal calculado
Qi	Caudal imposto
Q_{LC}	Caudal do leito de cheia
Q_{LP}	Caudal do leito principal
Q_{total}	Caudal total
R	Raio hidráulico
Re	Número de Reynolds
S	Área da secção transversal do canal
U	Velocidade longitudinal
Ud	Velocidade média em profundidade
Um	Velocidade média na secção

U_{max}	Velocidade máxima
U_s	Velocidade média na secção
V'	Componente de flutuação da velocidade transversal
(V, W)	Vectores das correntes secundárias
V_x	Velocidade longitudinal
X	Posição longitudinal no canal
Y	Posição transversal no canal
Z	Posição vertical no canal; Profundidade
d	Diâmetro do tronco das árvores
e	Espaçamento entre troncos de árvores
g	Aceleração da gravidade
h_{LC}	Altura de água do leito de cheia
h_{LP}	Altura de água do leito principal
hr	Altura Relativa
i	Inclinação média do canal
lc	Leito de cheia
lp	Leito principal
\bar{u}	Velocidade média; Velocidade longitudinal
u'	Componente de flutuação da velocidade longitudinal
v'	Componente de flutuação da velocidade transversal
y	Posição transversal do canal
w'	Componente de flutuação da velocidade vertical
ξ	Diferença entre o caudal calculado e o imposto
ρ	Massa volúmica
τ_0	Tensões de arrastamento
τ_{xy}	Tensões de Reynolds horizontais
τ_{xyd}	Tensões de Reynolds horizontais médias em profundidade

Índice de Figuras

Figura 1.1: Inundações na cidade de Auchenflower, Austrália devido ao desdobramento do rio Brisbane (2011).....	1
Figura 1.2: Geometria transversal de um canal com leitos de cheia em duas fases (adaptada de Ward <i>et al.</i> , 2004)	2
Figura 1.3: Vegetação marginal no rio Lowden, Illinois (E.U.A).....	2
Figura 2.1: Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma fronteira sólida (adaptado de Akan, 2006).....	5
Figura 2.2: Desenvolvimento da camada de mistura num canal de secção composta (adaptada de Proust <i>et al.</i> 2010)	6
Figura 2.3: Vórtices de eixo vertical na interface entre o leito principal e o leito de cheia (Sellin, 1964, em Terrier <i>et al.</i> 2010)	7
Figura 2.4: Modelo conceptual da interacção entre os dois tipos de vórtices em 3-D (adaptada de Nezu & Nakayama 1997).....	7
Figura 2.5: Descrição esquemática da estrutura turbulenta em canais com secção composta (adaptada de Shiono & Knight, 1991, em Pinto 2010)	8
Figura 2.6: a) Vórtices de eixo vertical visíveis devido ao uso de corante (adaptada de van Prooijen <i>et al.</i> , 2000) e b) Interacção no escoamento (Nezu <i>et al.</i> , 1999)	9
Figura 2.7: Vectores das correntes secundárias para varias alturas relativas (a) $h_r = 0.75$, (b) $h_r = 0.25$ e (c) $h_r = 0.5$ e Leito de cheia rugoso (Tominaga e Nezu 1991)	9
Figura 2.8 : Influencia da geometria da secção nas correntes secundárias (Nezu e Nakayama 1997)	10
Figura 2.9: Distribuição da tensão de arrastamento em canais de secção trapezoidal submetidos a variações na altura relativa (Yuen, 1989).....	10
Figura 2.10: Tensões de Reynolds τ_{xy} e τ_{xz} num canal de secção composta a diferentes alturas relativas (Shiono and Knight 1991)	11
Figura 2.11: (a) Perfil de velocidades velocidade media em profundidade sobre velocidade média da secção (b) Rácio entre capacidade de descarga do leito principal sobre leito de cheia (Myers <i>et al.</i> , 2001).....	12
Figura 2.12: Influencia da rugosidade nos vectores de correntes secundarias e na distribuição da velocidade longitudinal (adaptada de Yang <i>et al.</i> 2007).....	12
Figura 2.13: Distribuição da velocidade longitudinal média no tempo para $hr020$, a) leitos de cheia lisos e b) leitos de cheia rugosos (adaptada de Fernandes, 2013).....	13
Figura 2.14 : Tensões de Reynolds τ_{xy} e τ_{xz} num canal de secção composta para quatro casos, (a) sem vegetação; (b) arvores; (c) hastes; (d) relva (yang et al., 2007)	13

Figura 2.15: Distribuição τ_{xy} média no tempo para hr020, a) leitos de cheia lisos e b) leitos de cheia rugosos (adaptada de Fernandes, 2013)	14
Figura 2.16: Zonamento típico da vegetação num corredor ripícola (Fernandes & Cruz, 2011)	15
Figura 2.17: (a) Distribuição transversal da velocidade média em profundidade; (b) Distribuição transversal das tensões de arrastamento (adaptada de Terrier et al., 2010)	16
Figura 2.18 : Velocidade longitudinal e correntes secundárias (adaptada de Sanjou <i>et al.</i> 2011)	17
Figura 2.19 : Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} (adaptada de Sanjou <i>et al.</i> 2011)	17
Figura 2.20: Velocidade longitudinal normalizada sem vegetação na junção sem vegetação (adaptada de Sun e Shiono 2009)	18
Figura 2.21: Velocidade longitudinal normalizada, $ed = 13,8$ (adaptada de Sun e Shiono, 2009)	19
Figura 2.22: Velocidade longitudinal normalizada, $ed = 3,8$ (adaptada de Sun e Shiono 2009)	19
Figura 3.1 (a) Canal de secção composta, (b) Elementos de estabilização do escoamento e (c) Sistema de comportas	22
Figura 3.2: Representação esquemática da secção transversal	22
Figura 3.3: Elementos verticais utilizados para simular vegetação na interface dos leitos.	23
Figura 3.4: Equipamentos de controlo de Caudal	23
Figura 3.5: Modo de fixação dos hidrómetros e do Velocímetro (Retirada de Rodrigues 2012)	24
Figura 3.6: Vectrino, medidor acústico Doppler (ADV) (www.nortek.no)	24
Figura 3.7: Dimensões do Vectrino (www.nortek.no)	25
Figura 3.8 Introdução do pó de sílica, a) aplicação do pó de sílica através da mangueira e b) Reservatório	25
Figura 3.9: Procedimento experimental	26
Figura 3.10: Malha de medição adoptada nas secções transversais	27
Figura 3.11: Malha de medição em planta	27
Figura 3.12: Sentido positivo dos eixos adoptados	28
Figura 4.1: Medições efectuadas na proximidade da secção $x = 7500$, com relva sintética no leito de cheia e a) elementos verticais com folhagem b) elementos verticais sem folhagem	30
Figura 4.2 : Layout do Software Vectrino onde se realizou a recolha e o processamento de dados	31
Figura 4.3 : Aplicação do filtro Goring e Nikora modificado em Wahl (2003) na secção transversal $X = 7500$ para $hr = 0,30$	32
Figura 4.4: Perfil vertical da velocidade na posição $y = 0,85$ m para $hr015$	33
Figura 4.5: Esquematização da integração realizada para cálculo de caudal escoado na secção referente ao ponto $y = 0,85$ para $hr015$	33
Figura 4.6 : Comparação entre a distribuição da velocidade longitudinal a 40 % da altura de água e a velocidade média através do método de integração em profundidade quando os elementos verticais são troncos, a) $hr = 0,20$ e b) $hr = 0,30$	35
Figura 5.1: Altura do escoamento em $hr015$	38
Figura 5.2: Distribuição das velocidades para $hr015$ com árvores, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade	39
Figura 5.3: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para $hr015$	40
Figura 5.4: Altura do escoamento em $hr020$	40

Figura 5.5: Distribuição das velocidades para hr020 com árvores, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade	41
Figura 5.6: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr020	42
Figura 5.7: Altura do escoamento em hr030.....	42
Figura 5.8: Distribuição das velocidades para hr030 com árvores, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade	43
Figura 5.9: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr030	44
Figura 5.10: Distribuição das tensões de Reynolds para hr015 com árvores; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade.....	45
Figura 5.11: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr015	46
Figura 5.12: Distribuição das tensões de Reynolds para hr020 com árvores; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade.....	47
Figura 5.13: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr020	48
Figura 5.14: Distribuição das tensões de Reynolds para hr030 com árvores; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade.....	49
Figura 5.15: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr030	50
Figura 5.16: Distribuição das velocidades para hr020 com troncos, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade	51
Figura 5.17: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr020	52
Figura 5.18: Distribuição das velocidades para hr030 com troncos, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade	53
Figura 5.19: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr030	54
Figura 5.20: Distribuição das tensões de Reynolds para hr020 com troncos; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade.....	55
Figura 5.21: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr020	56
Figura 5.22: Distribuição das tensões de Reynolds para hr030 com troncos; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade.....	57
Figura 5.23: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr030	57
Figura 5.24: Comparação entre os resultados da distribuição das velocidades longitudinais obtidos com diferentes elementos verticais para hr020, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade	58

Figura 5.25: Comparação entre os resultados da distribuição das velocidades longitudinais obtidos com diferentes elementos verticais para hr030, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade	59
Figura 5.26: Comparação entre os resultados da das tensões de Reynolds obtidos com diferentes elementos verticais para hr020; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade.....	60
Figura 5.27: Comparação entre os resultados das tensões de Reynolds obtidos com diferentes elementos verticais para hr030, a) distribuição τ_{xy} média no tempo e b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade.....	61

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 : Resumo das medições consideradas.....	29
Tabela 4.2: Condições hidráulicas de escoamento.....	31
Tabela 4.3 : Comparação entre o Caudal Calculado e o Caudal Imposto	34

1. Introdução

1.1. Considerações Gerais

O risco associado à ocorrência de cheias esteve sempre presente ao longo da evolução das sociedades humanas. As primeiras civilizações históricas surgiram nas bacias fluviais dos grandes rios, e desde então houve sempre uma grande preocupação em minimizar os impactos negativos que frequentemente ocorriam, o que levou à construção de diques e a edificação dos núcleos urbanos na orla dos leitos de cheia. A ocorrência de cheias deve-se essencialmente a condicionantes meteorológicas, tais como chuvas intensas prolongadas ou repentinas em conjunto com agitação marítima ou movimentos de maré. Podem também haver outros factores importantes como a fisiografia das bacias hidrográficas ou mesmo a impermeabilização (por acção humana) e urbanização dos leitos. As cheias normalmente trazem efeitos nefastos que podem variar desde a danificação de propriedade, submersão ou destruição de vias de comunicação infra-estruturas e equipamentos, suspensão do fornecimento de bens ou serviços básicos, isolamento de populações e eventual perda de vidas humanas (Figura 1.1).



Figura 1.1: Inundações na cidade de Auchenflower, Austrália devido ao desdobramento do rio Brisbane (2011)

Dados recolhidos pelo Center of Research on the Epidemiology of Disasters – CRED entre 1980 e 2008 indicam que o número de desastres causados por cheias manteve-se estável nas primeiras duas décadas aumentando drasticamente desde então. Na tentativa de minimizar os efeitos negativos provocados pelas cheias diversas soluções tem sido adoptadas, numa primeira fase concentrou-se os esforços numa abordagem estrutural do problema com a construção de taludes, endireitamento dos canais ou mesmo a construção de reservatórios na tentativa de conter o escoamento no canal principal, contudo estas soluções frequentemente falhavam o seu

objectivo. Tornou-se evidente que era necessário focar-se no conjunto canal principal – leito de cheia (Islam, 2001). O leito de cheia passou a ter um papel principal nas estratégias de contenção de cheias e, devido à sua complexidade o comportamento hidrodinâmico na ligação entre o leito de cheia e o canal principal tem vindo a ser objecto de diversos estudos científicos. A combinação de factores ambientais e económicos sustentados com um crescente conhecimento científico acerca das características do escoamento, tem sido responsável por novas práticas na gestão e no restauro dos rios nos últimos anos. Procedimentos de manutenção e correcção, soluções de traçado mais evoluídas como leitos de cheia de duas fases (Figura 1.2) são exemplos desta nova abordagem, tendo em atenção que os rios inundam e que têm que ter espaço para se mover (Gilvear & Wharton, 2007).

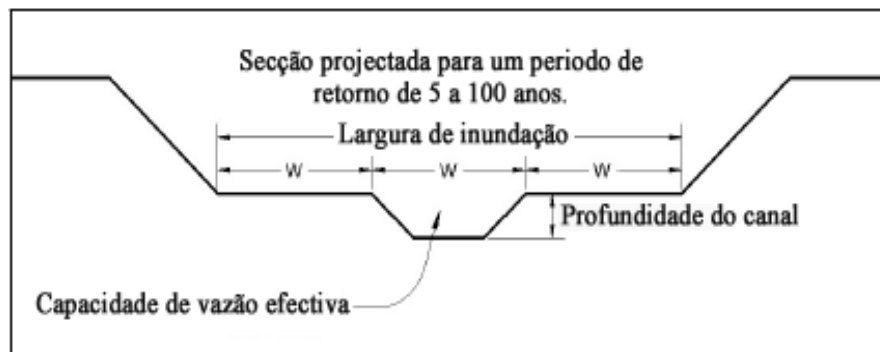


Figura 1.2: Geometria transversal de um canal com leitos de cheia em duas fases (adaptada de Ward *et al.*, 2004)

Morfologicamente os rios frequentemente apresentam árvores ou arbustos ao longo das margens (Figura 1.3), esta característica acrescenta maior dificuldade na análise do comportamento do escoamento, nas últimas duas décadas tem-se intensificado o estudo dos efeitos de vegetação no escoamento e resistência em canais de secção composta.



Figura 1.3: Vegetação marginal no rio Lowden, Illinois (E.U.A)

É neste sentido que o presente estudo visa através de procedimentos experimentais caracterizar o escoamento quando a capacidade de vazão no leito principal é excedida. Nos ensaios o leito de cheia contendo hastes ao longo das margens é inundado formando uma complexa estrutura de escoamento. Diversos estudos demonstram que, na generalidade dos casos, os leitos de cheia, mais rugosos e lentos retardam o escoamento do canal principal, mais fundo e mais rápido, promovendo a transferência de massa e de quantidade linear de movimento, o que resulta numa significativa perda de energia e diminuição da capacidade de vazão (e.g. Knight & Demetriou, 1983).

1.2. Objectivos e organização da dissertação

Este trabalho tem como objectivo caracterizar experimentalmente a influência da vegetação, ao longo da interface entre o leito principal e o leito de cheia, no escoamento em situação de regime uniforme para leitos rugosos, com determinada altura de água escoada. Para esse efeito foram definidos os seguintes objectivos:

- Caracterização do campo de velocidades e de tensões horizontais com dois tipos de elementos verticais
- Avaliar o efeito da forma dos elementos verticais, alinhados longitudinalmente na interface, na estrutura de escoamento
- Influência da altura relativa

A dissertação que aqui se apresenta está dividida em seis capítulos, descreve-se de seguida o seu conteúdo:

- No presente capítulo realiza-se o enquadramento do tema e define-se os objectivos que se pretende atingir.
- No segundo capítulo são revistos os conceitos teóricos necessários para interpretar e analisar os resultados obtidos, assim como são analisados alguns trabalhos de diversos autores.
- No terceiro capítulo faz-se a descrição detalhada da instalação experimental, dos equipamentos de medição e controlo utilizados nos ensaios e explica-se o procedimento experimental adoptado.
- No quarto capítulo explica-se como é feito o processamento dos dados recolhidos e caracteriza-se os ensaios realizados.
- No quinto capítulo apresentam-se todos os dados recolhidos, analisa-se e interpreta-se a influência da altura relativa no escoamento em torno de vegetação nas margens do canal de secção composta.
- No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões mais relevantes do trabalho realizado e são sugeridas novas possibilidades de desenvolvimento da investigação.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Escoamentos em canais de secção composta lisos

Desde 1960 que é perceptível uma intensificação do estudo em canais de secção composta, uma vez que o entendimento da interacção entre o leito principal e o leito de cheia é essencial para a avaliação e gestão do risco de inundações.

O conceito de camada limite é importante na caracterização de qualquer escoamento turbulento. Quando um fluido real escoar sobre uma superfície sólida, as partículas em contacto com a superfície permanecem em repouso, independentemente da rugosidade. No entanto as partículas imediatamente acima possuem, paralelamente, uma velocidade finita. Como tal a fronteira sólida gera um gradiente de velocidade (e.g. Akan, 2006). A quantidade de fluido influenciada por este gradiente denomina-se de camada limite, estendendo-se até ao ponto onde a velocidade do fluido é igual a 99% da velocidade de escoamento principal (e.g. Schlichting, 1979). A espessura da camada limite aumenta à medida que o fluido escoar sobre a superfície livre, devido ao aumento contínuo das tensões tangenciais na superfície sólida geradas pelo gradiente de velocidade.

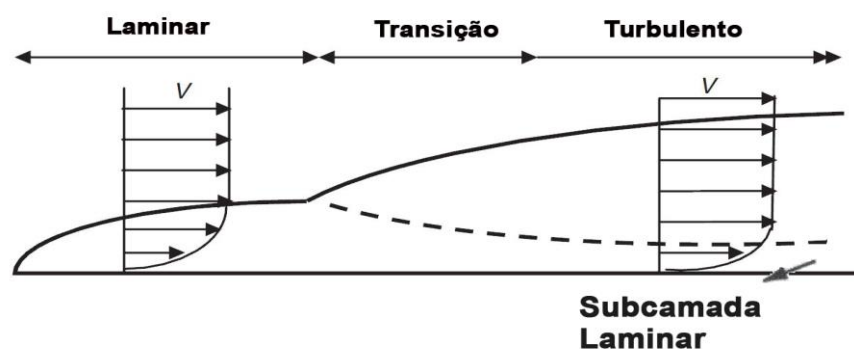


Figura 2.1: Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma fronteira sólida (adaptado de Akan, 2006)

Como se pode visualizar na Figura 2.1, o aumento contínuo das tensões tangenciais faz com que a camada limite inicialmente fina e com características laminares passe por uma zona de transição, onde vai espessando rapidamente deixando o escoamento de ser laminar até se tornar turbulento.

No que diz respeito à camada limite turbulenta quando as partículas se aproximam da fronteira sólida a turbulência diminui drasticamente formando uma subcamada onde o escoamento é laminar. Verifica-se também que devido ao aumento de velocidade ao longo da camada limite turbulenta o gradiente de velocidade junto da fronteira sólida é mais acentuado, originando maiores tensões tangenciais junto do fundo (e.g. Akan, 2006).

Admitindo uma situação ideal em que dois escoamentos ocorrem paralelamente no seu domínio, o diferencial de velocidade transversal entre ambos irá proporcionar o transporte de quantidade de movimento. Ao local onde se dá esta transferência de quantidade de movimento entre os dois escoamentos dá-se o nome de camada de mistura. A formação do diferencial de velocidade responsável pelo desenvolvimento da camada de mistura em escoamentos fluviais poder-se-á agrupar em três categorias (Vermaas, *et al.* 2011):

- Canais de secção composta
- Confluência de correntes com velocidades diferentes
- Canais com rugosidade composta no fundo

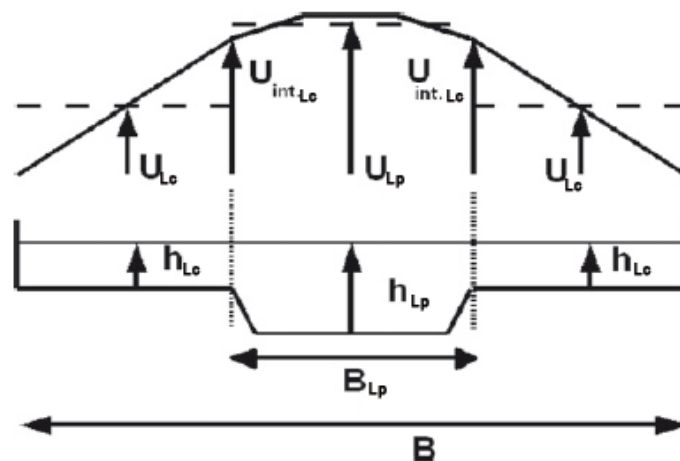


Figura 2.2: Desenvolvimento da camada de mistura num canal de secção composta (adaptada de Proust *et al.* 2010)

Para o presente estudo apenas interessa analisar o desenvolvimento da camada de mistura em canais de secção composta (Figura 2.2). Considerando que a alimentação de um canal de secção composta é independente, podem-se observar dois tipos de vórtices na proximidade da junção. O primeiro tipo denominado de corrente secundária, classificadas por Prandtl (1952) em duas categorias – de primeiro e de segundo tipo. Correntes secundárias de primeiro tipo derivam da inclinação do escoamento principal e das forças centrífugas. As correntes de segundo tipo são causadas pela heterogeneidade e anisotropia transversal da turbulência, com eixo longitudinal e formato helicoidal. Shiono & Knight (1991) concluíram que a contribuição das correntes secundárias para transferência de quantidade de movimento em canais de secção composta depende da altura relativa e das características geométricas na interface.

O segundo vórtice é traduzido por um movimento horizontal em larga escala, com eixo vertical, que se gera longitudinalmente perto da interface entre o escoamento do leito principal, mais fundo e mais rápido e o do leito de cheia mais lento e mais rugoso. Este diferencial de velocidade promove uma transferência de quantidade de movimento entre os leitos, que acaba por actuar como tensão e oferece resistência ao escoamento longitudinal junto da interface. Sellin (1964) identificou este tipo de vórtices fotografando o movimento de pó de alumínio, previamente inserido na água, à medida que este escoava para jusante (Figura 2.3).

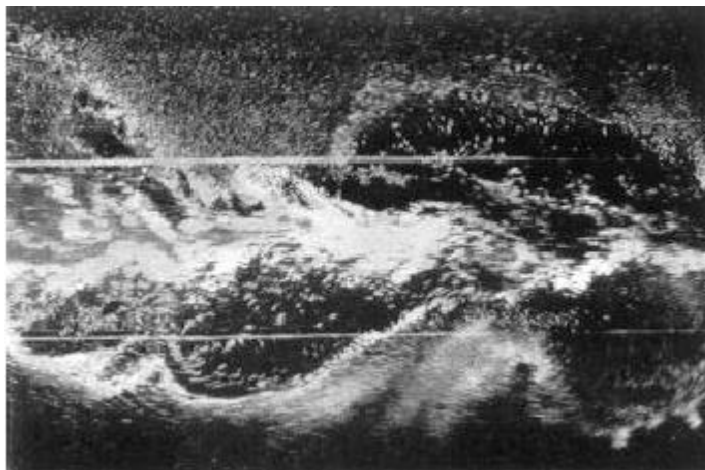


Figura 2.3: Vórtices de eixo vertical na interface entre o leito principal e o leito de cheia (Sellin, 1964, em Terrier *et al.* 2010)

A transferência de quantidade de movimento entre os leitos resulta numa diminuição da capacidade de descarga do leito principal e consequentemente num aumento no leito de cheia, globalmente a capacidade de vazão do canal de secção composta diminui. Contudo num escoamento real o movimento dos vórtices é mais complicado, o facto de haver uma estreita conexão entre ambos indica que estes tem comportamento tridimensional e fazem parte de uma complexa estrutura de escoamento (Nezu & Nakayama 1997).

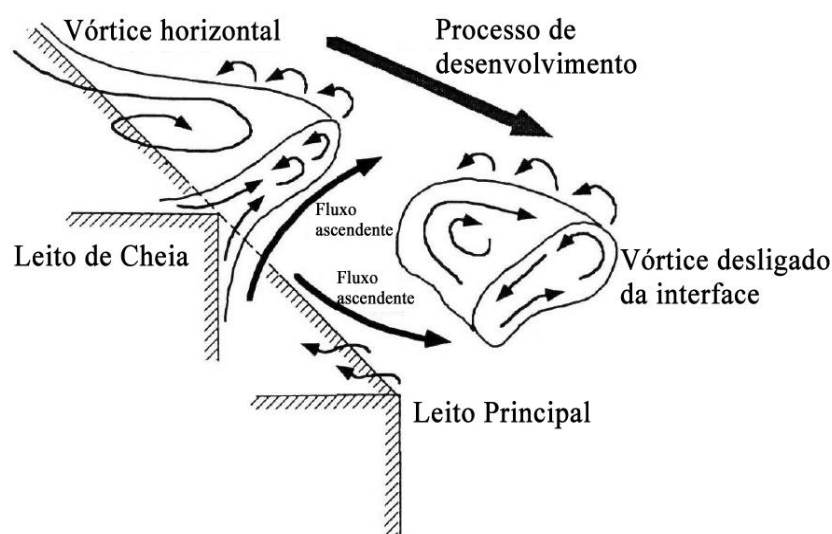


Figura 2.4: Modelo conceptual da interacção entre os dois tipos de vórtices em 3-D (adaptada de Nezu & Nakayama 1997)

Devido à forte interacção existente entre o leito principal e o leito de cheia, existe alguma dificuldade na caracterização do escoamento em canais de secção composta. Considerando que o canal tem largura constante, que o escoamento é turbulento e em regime uniforme, os principais factores responsáveis pela perda de energia ao longo do canal são: a tensão de arrastamento e a transferência de quantidade de movimento devido aos dois tipos de vórtices, de eixo longitudinal e de eixo vertical (Shiono & Knight, 1991).

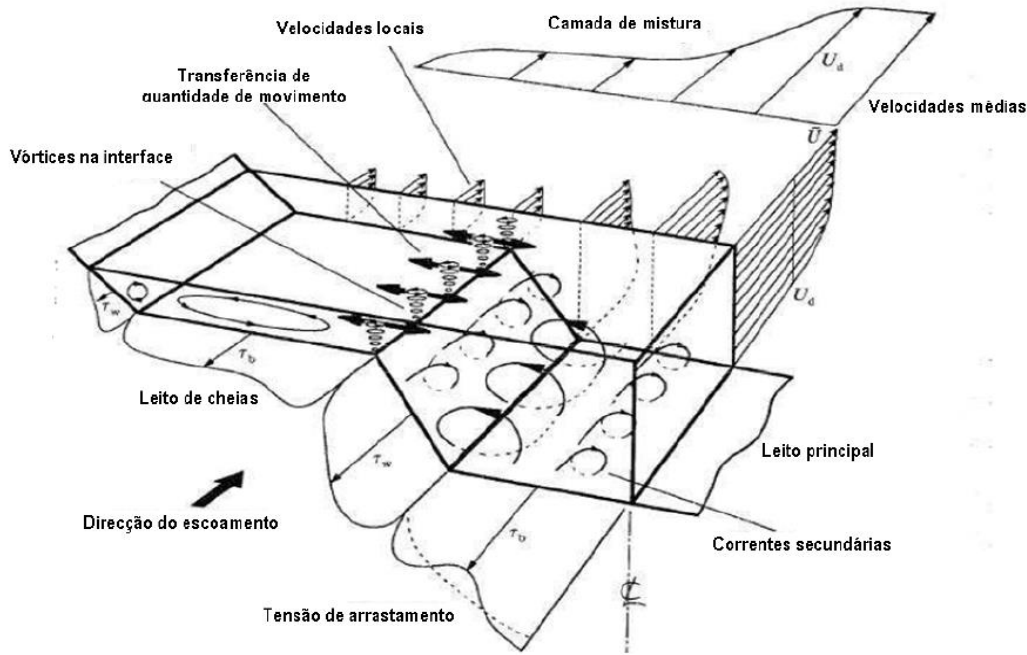


Figura 2.5: Descrição esquemática da estrutura turbulenta em canais com secção composta (adaptada de Shiono & Knight, 1991, em Pinto 2010)

Na Figura 2.5 podemos observar as principais características do escoamento turbulento em canal de secção composta. Os vórtices de eixo longitudinal e de forma helicoidal, que se desenvolvem transversalmente ao movimento geral do conjunto e os vórtices de eixo vertical localizados na interface entre os dois leitos e principais responsáveis pela transferência de quantidade de movimento. À medida que se afasta da parede constata-se que a velocidade aumenta tendo valor máximo no centro do leito principal. No que diz respeito ao perfil vertical de velocidades verifica-se que a velocidade do fluido apresenta um crescimento rápido desde um valor nulo, por estar a ser directamente influenciado pela tensão de arrastamento no fundo, até um valor máximo encontrado imediatamente antes da superfície livre. As tensões de arrastamento têm valor nulo quando o fluido está em contacto com as superfícies das paredes laterais, tendo valor máximo também no centro do leito principal sendo precedido de uma inflexão no crescimento.

Como já foi referido os vórtices apresentados são factores essenciais na estrutura de escoamento mas não sucedem isoladamente. Existem diversas características que influenciam os vórtices directamente, produzindo alterações principalmente na sua intensidade e modificando indirectamente a estrutura global de escoamento. Estas características são fundamentalmente a altura relativa h_r , a rugosidade dos leitos e a geometria da secção. A altura relativa (h_r) de um canal de secção composta é definido pelo rácio entre a altura de água no leito de cheia (h_{LC}) e altura de água no leito principal (h_{LP})

$$h_r = \frac{h_{LC}}{h_{LP}} \quad 2.1$$

A intensidade da interacção entre o leito principal e o leito de cheia está fortemente dependente da altura relativa. No que diz respeito aos vórtices de eixo vertical, quanto menor h_r maior a sua intensidade. Nezu *et al.* (1999) mostraram que quando $h_r < 0,375$ os centros dos vórtices estão quase sempre localizados na interface dos leitos (Figura 2.6), dividindo-se em duas regiões quando $h_r > 0,375$ cada uma no respectivo leito.

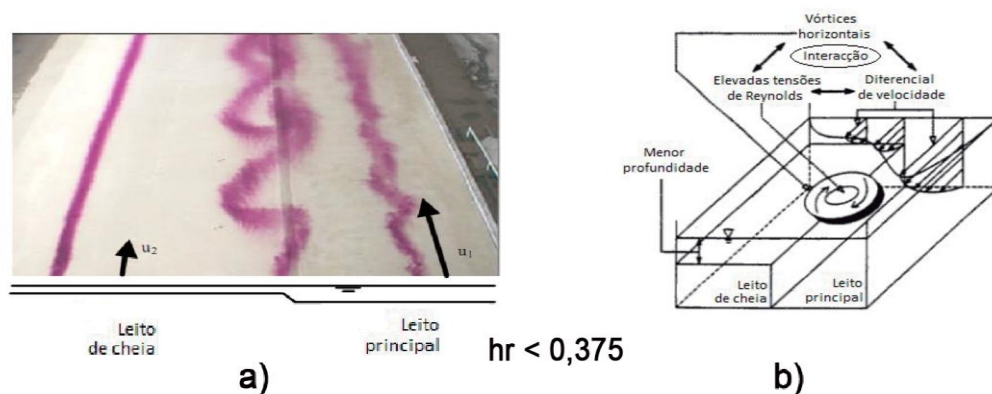


Figura 2.6: a) Vórtices de eixo vertical visíveis devido ao uso de corante (adaptada de van Prooijen *et al*, 2000) e b) interação no escoamento (Nezu *et al*, 1999)

Por sua vez Tominaga and Nezu (1991) concluíram que a intensidade das correntes secundárias aumenta com o aumento da altura relativa (Figura 2.7)

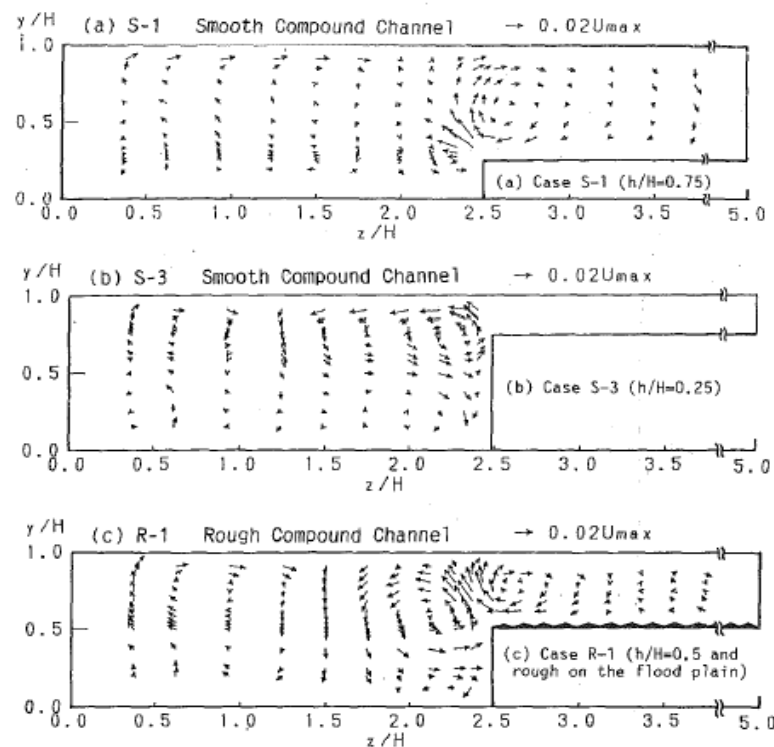


Figura 2.7: Vectores das correntes secundárias para várias alturas relativas (a) $h_r = 0.75$, (b) $h_r = 0.25$ e (c) $h_r = 0.5$ e leito de cheia rugoso (Tominaga & Nezu 1991)

Shiono & Knight (1989) investigaram a influência da geometria da secção transversal nas correntes secundárias no caso de canais de secção composta simétricos. Concluindo que a existência de correntes secundárias que se estendem do leito principal para o leito de cheia, não depende da geometria da secção. Observaram a formação de duas correntes predominantes, uma corrente com sentido horário no canal principal e uma de menor dimensão com sentido anti-horário no leito de cheia, ambas próximas da interface. A Figura 2.8 mostra o desenvolvimento das correntes secundárias em dois tipos de secção transversal.

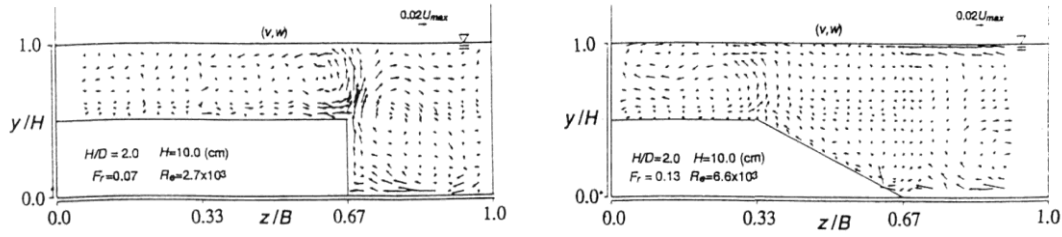


Figura 2.8 : Influência da geometria da secção nas correntes secundárias (Nezu & Nakayama 1997)

Como foi referido anteriormente para além dos vórtices, a tensão de arrastamento também é fortemente responsável pela perda de energia ao longo do canal. A tensão de arrastamento está directamente relacionada com a resistência oferecida ao escoamento, o transporte de sedimentos e a erosão das margens. As características tridimensionais da turbulência tornam a definição da tensão de arrastamento (τ_0) em canais de secção composta muito complexa. Divergindo do valor tido em conta quando consideramos o escoamento como bidireccional ($\rho g H S_0$), devido ao gradiente de tensão gerado pela transferência de momento na interface que acontece lateralmente entre o leito principal e o leito de cheia, muitas vezes chamada de tensão aparente (Shiono & Knight 1991). Tendo sido demonstrado em diversos estudos que a tensão de arrastamento no leito principal é usualmente menor que $\rho g H S_0$ e maior no leito de cheia (Sun, 2007).

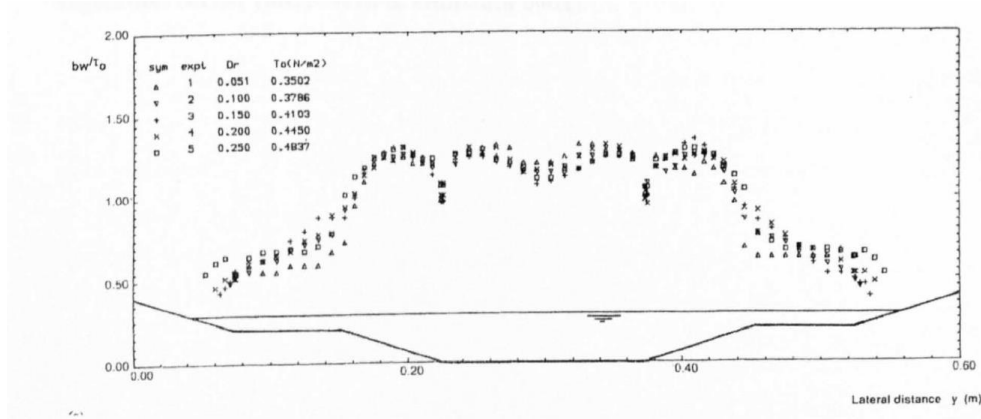


Figura 2.9: Distribuição da tensão de arrastamento em canais de secção trapezoidal submetidos a variações na altura relativa (Yuen, 1989)

Para além da tensão de arrastamento existe também uma tensão que se gera transversalmente ao escoamento. Esta tensão denomina-se de tensão de Reynolds, e representa a transferência de quantidade de movimento que deriva da flutuação do campo de velocidades. A tensão de Reynolds pode ser definida através da seguinte equação:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad 2.2$$

Onde, ρ representa a massa volúmica do fluido, u'_i e u'_j são as flutuações nas direcções x_i e x_j respectivamente. A Figura 2.10 apresenta a distribuição transversal das tensões de Reynolds para várias alturas relativas obtidas por Shiono an Knight (1991) num canal de secção composta.

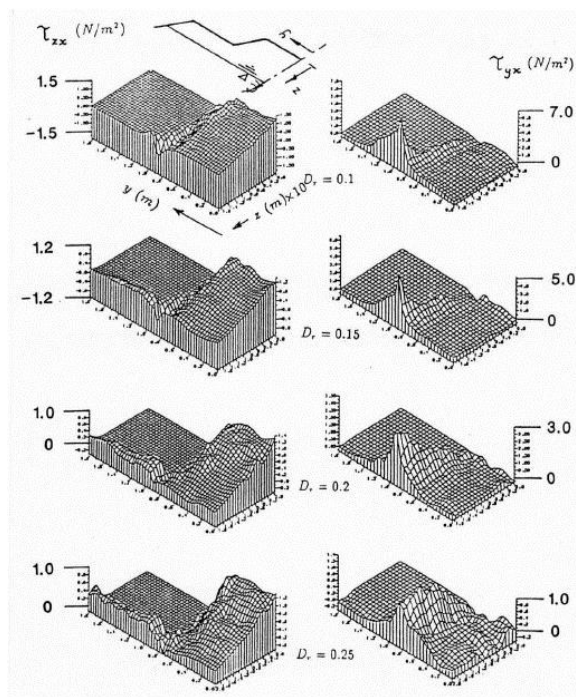


Figura 2.10: Tensões de Reynolds τ_{xy} e τ_{xz} num canal de secção composta a diferentes alturas relativas (Shiono & Knight 1991)

Os valores de tensão de Reynolds na interface sugerem que existe troca de quantidade de movimento lateralmente entre o leito de cheia e o leito principal. Como a água no leito de cheia escoia a uma velocidade substancialmente mais baixa que no leito principal gera-se uma zona de tensão na interface dos escoamentos. À medida que se diminui a altura relativa o gradiente de velocidade entre os leitos aumenta, resultando num aumento da intensidade das tensões de Reynolds na junção.

2.2. Escoamentos em canais de secção composta com leitos rugosos

A existência de rugosidade nos leitos de cheia é bastante comum nos escoamentos em canais de secção composta. Tem influência directa nos vórtices em particular nas correntes secundárias, formando pequenas células no leito de cheia. No estudo realizado por Myers *et al* (2001) mostrou-se o efeito da rugosidade do leito de cheia na velocidade e na relação capacidade de descarga/altura relativa (Figura 2.11). Este estudo teve particular importância devido à possibilidade de comparar os resultados obtidos experimentalmente num canal de secção composta com dados retirados de um escoamento real.

Mais tarde Yang *et al.* (2007) concluíram que a maior rugosidade no leito de cheia aumenta o gradiente lateral de velocidade aumentando também a tensão na interface vertical entre o leito de cheia e o leito principal.

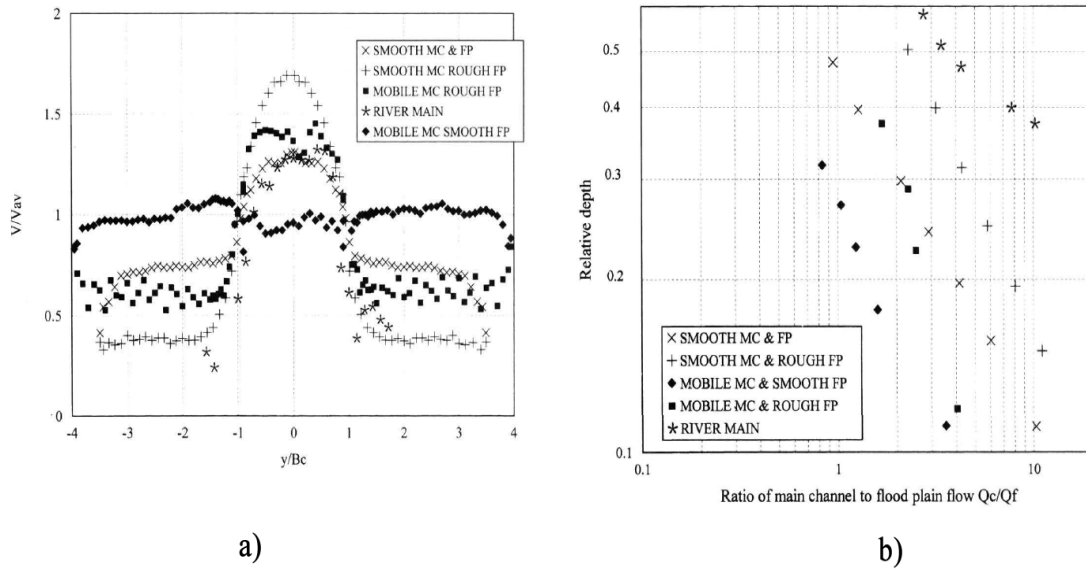


Figura 2.11:(a) Perfil de velocidades velocidade média em profundidade sobre velocidade média da secção (b) Rácio entre capacidade de descarga do leito principal sobre leito de cheia (Myers *et al*, 2001)

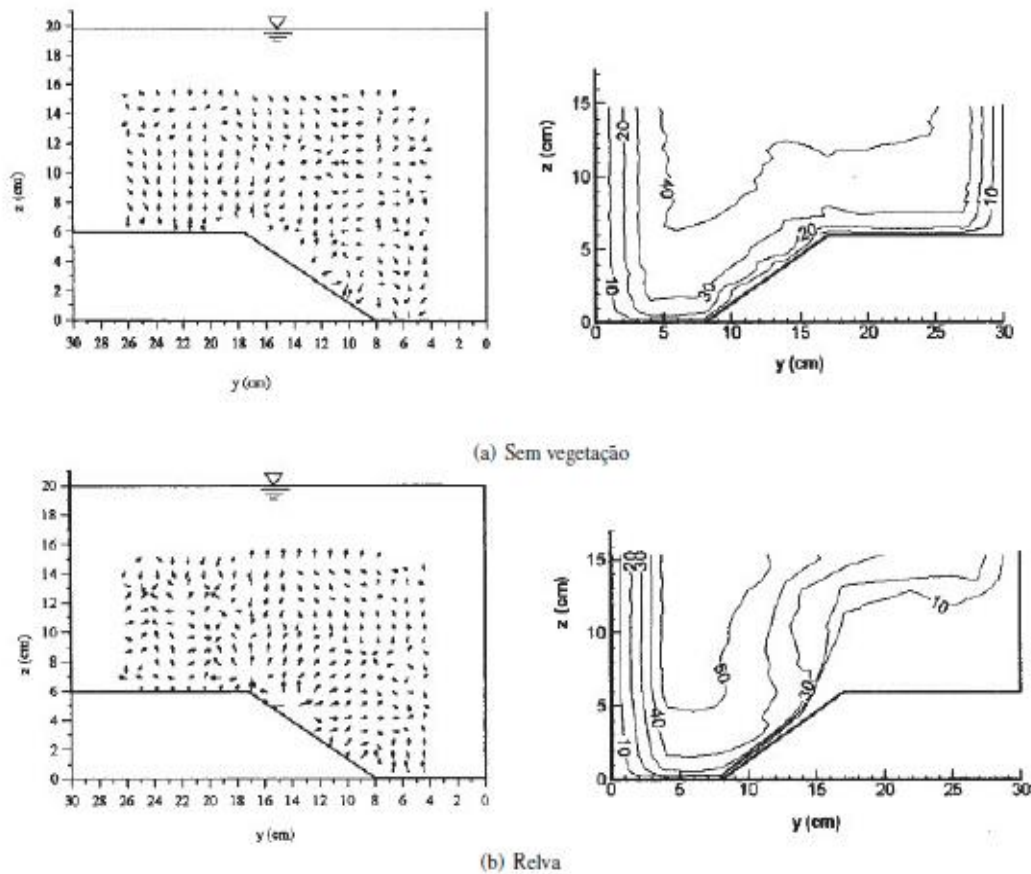


Figura 2.12: Influência da rugosidade nos vectores de correntes secundárias e na distribuição da velocidade longitudinal (adaptada de Yang *et al*. 2007)

Como podemos observar na Figura 2.12 há um aumento significativo da velocidade no leito principal quando o leito de cheia apresenta uma configuração rugosa, havendo alteração da estrutura das correntes secundárias.

Através dos resultados obtidos experimentalmente do desenvolvimento do escoamento na direcção longitudinal, no canal de secção composta Veiga da Cunha no LNEC, Fernandes (2013) considerou que na secção $X = 7,500$ m a camada de mistura encontra-se totalmente desenvolvida. Tendo em conta este facto comparou os resultados da velocidade longitudinal média no tempo para leitos de cheia lisos, comos resultados obtidos para leitos de cheia rugosos (Figura 2.13).

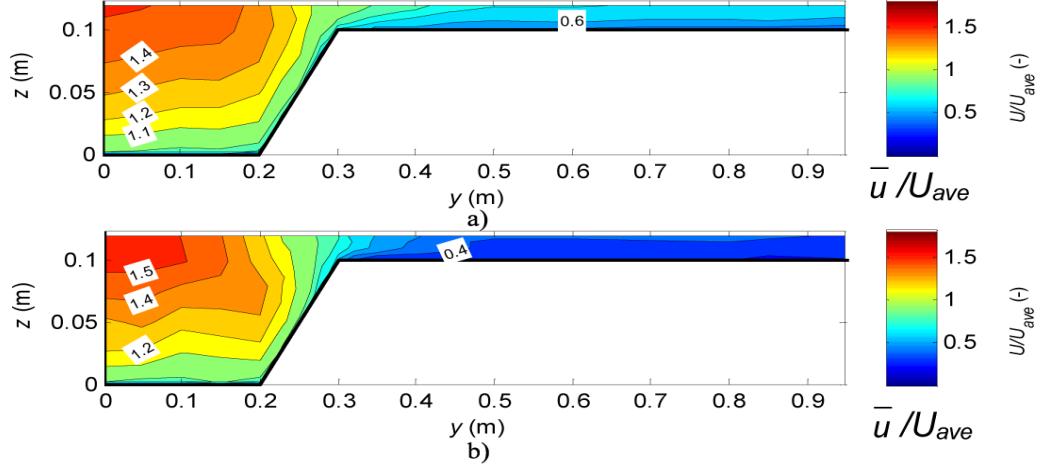


Figura 2.13: Distribuição da velocidade longitudinal média no tempo para $hr020$, a) leitos de cheia lisos e b) leitos de cheia rugosos (adaptada de Fernandes, 2013)

Concluiu que o aumento da rugosidade conduz a menores velocidades de escoamento no leito de cheia. O aumento da rugosidade também influencia fortemente o escoamento no leito principal, registando-se um aumento da área onde se dão as velocidades máximas. Na interface, a curvatura das isolinhas na direcção da superfície deixa de ser visível, indicando que as correntes secundárias não têm força suficiente para influenciar a distribuição longitudinal da velocidade.

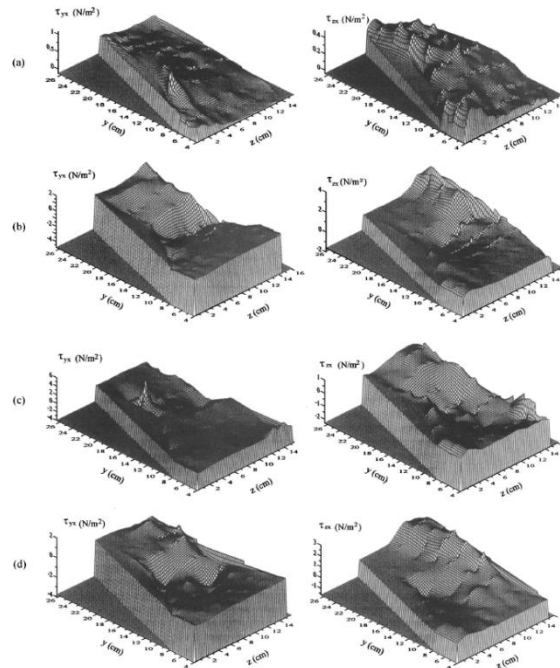


Figura 2.14 : Tensões de Reynolds τ_{xy} e τ_{xz} num canal de secção composta para quatro casos, (a) sem vegetação; (b) árvores; (c) hastes; (d) relva (Yang et al., 2007)

Com o propósito de complementar a caracterização do escoamento em canais de secção composta, Yang *et al.* (2007) testaram a resposta do escoamento à introdução de vegetação no leito de cheia. Para tal efeito modelaram três tipos de vegetação, relva, hastes sem folhagem e árvores ao longo de 3 metros de canal. A Figura 2.14 apresenta as tensões de Reynolds (τ_{xy}) em toda a largura da secção transversal a diferentes cotas.

Como se pode verificar através da análise da figura, a presença de relva no leito de cheia resulta num aumento das tensões de Reynolds. Como era de esperar a relva faz com que o gradiente de velocidade entre os leitos aumente, aumentando assim a flutuação do campo de velocidades que acaba por gerar uma maior tensão ao escoamento.

Seguindo as mesmas considerações descritas anteriormente Fernandes (2013), comparou os resultados das tensões τ_{xy} entre leitos de cheia lisos e rugosos. Concluiu que as tensões estão fortemente relacionadas com o gradiente de velocidade apresentado na Figura 2.13. Quando se aumenta a rugosidade do leito de cheia, o gradiente de velocidade entre os dois leitos aumenta resultando num aumento significativo das tensões de Reynolds na interface (Figura 2.15).

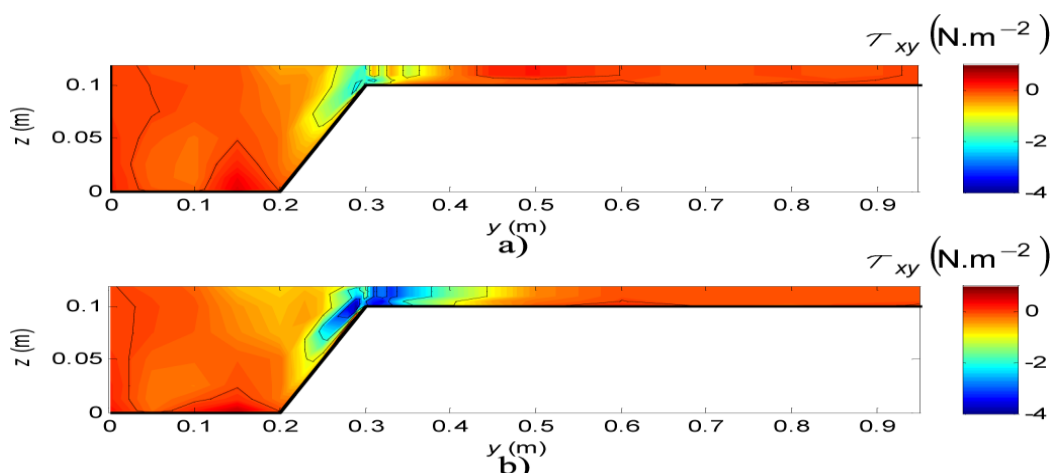


Figura 2.15: Distribuição τ_{xy} média no tempo para hr020, a) leitos de cheia lisos e b) leitos de cheia rugosos (adaptada de Fernandes, 2013)

2.3. Escoamentos em canais com secção composta com vegetação

A vegetação marginal nos leitos dos rios, por vezes denominada por vegetação ripícola, funciona como protecção mecânica natural protegendo as margens da acção erosiva do escoamento, contribuindo assim para a estabilização das margens. Este tipo de vegetação foi dividida por Fernandes & Cruz (2011) em três grandes grupos (Figura 2.16)

- Árvores e arbustos das margens
- Juncos e caniços (vegetação aquática)
- Outros elementos (sub-bosque e herbáceas)

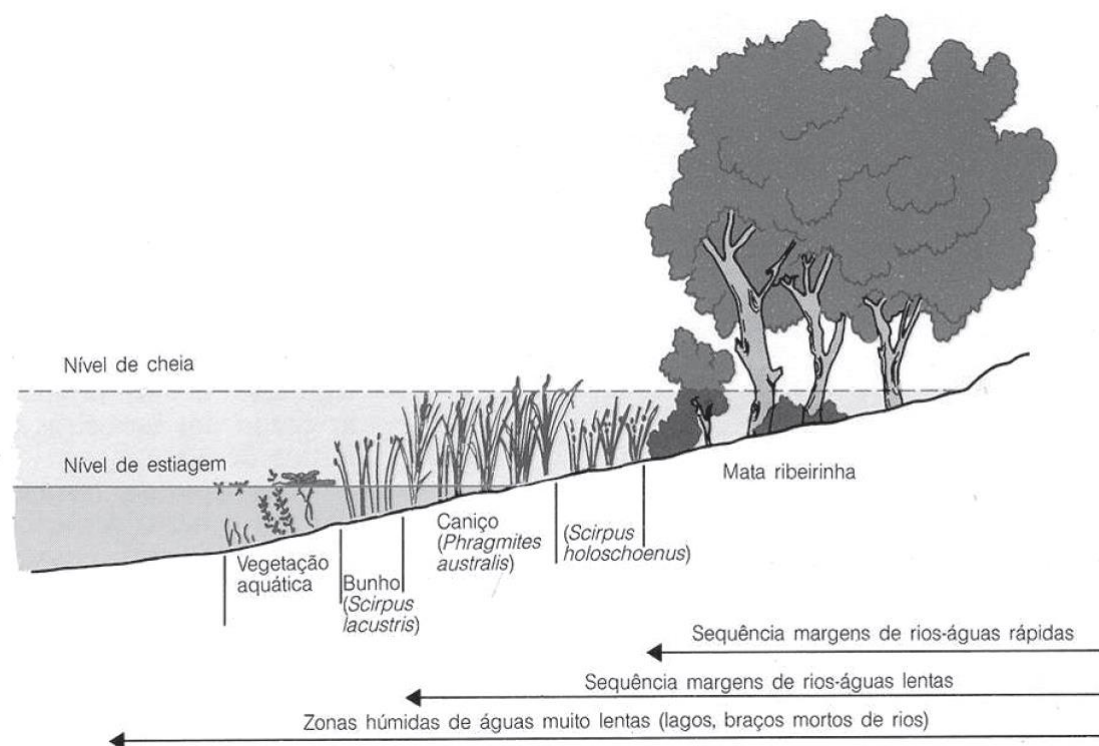


Figura 2.16: Zonamento típico da vegetação num corredor ripícola (Fernandes & Cruz, 2011)

Os estudos da influência de vegetação ribeirinha na estrutura do escoamento dividem frequentemente este tipo de vegetação em dois grandes grupos: vegetação rígida e vegetação flexível. Elementos verticais com valores de rigidez inferiores a 200 N/m^2 são considerados flexíveis sendo os restantes considerados rígidos. Em termos de comportamento a diferença entre ambos prende-se com a indeformabilidade da vegetação rígida à medida que é atravessada pelo escoamento. De notar que o presente estudo apenas irá ter em conta vegetação rígida (Sun, 2007).

Quando os leitos de cheia apresentam vegetação gera-se uma tensão lateral na interface, os mecanismos de transferência de quantidade de movimento assimilam-se à caracterização feita por Pasche & Rouve (1985) para canais de secção composta com rugosidade uniforme. No entanto a vegetação emergente causa uma resistência adicional ao escoamento nos leitos de cheia, aumentando o diferencial de velocidade acabando por impedir a transferência de quantidade de movimento entre os leitos.

Na tentativa de modelar fisicamente vegetação ripícola, Terrier *et al.* (2010) alinharam ao longo da margem do leito de cheia escovas cilíndricas presas a um tubo de metal com 35 e 3 mm de diâmetro respectivamente. Usando rácios $e/d = 8$ e $e/d = 16$, em que e se refere ao espaçamento e d ao diâmetro da escova, compararam a distribuição transversal da velocidade média em profundidade e as distribuições transversais das tensões de arrastamento, para diferentes alturas relativas com e sem vegetação.

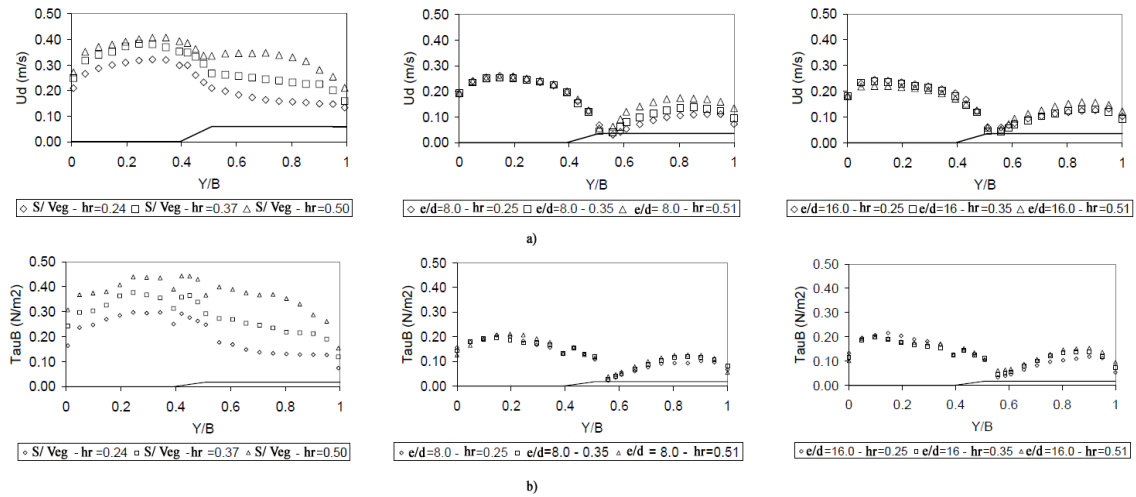


Figura 2.17: (a) Distribuição transversal da velocidade média em profundidade; (b) Distribuição transversal das tensões de arrastamento (adaptada de Terrier et al.,2010)

A Figura 2.17 apresenta a distribuição transversal da velocidade média em profundidade e das tensões de arrastamento. Foram testados três cenários: ausência de escovas na interface, espaçamentos entre escovas de $e/d = 8$ e $e/d = 16$, tendo sido avaliada também a influência da altura relativa. Verifica-se que as velocidades máximas ocorrem quando se aumenta a altura relativa, havendo uma aproximação de valores de velocidade junto à parede para todas as alturas. Como seria de esperar a velocidade na zona da vegetação é menor quanto maior for a densidade, por outro lado há um aumento da capacidade de descarga no canal principal relativamente aos resultados em que o espaçamento é maior. Muito embora as escovas tenham um efeito prejudicial no que diz respeito aos níveis de água, contribuem para a diminuição das velocidades no canal.

Em termos de tensões de arrastamento não se verificam grandes diferenças para os diferentes espaçamentos, é visível que na zona do leito de cheia há uma pequena alteração com o aumento da altura relativa.

Sanju *et al.* (2011), estudaram o escoamento turbulento em canais de secção composta tendo como objecto de estudo a presença ou ausência de vegetação na fronteira do leito principal com o leito de cheia. Foi colocada uma linha de vegetação emergente na junção dos leitos, com espaçamentos longitudinais de 10 cm. O escoamento decorreu à velocidade média U_m de 15cm/s e altura H de 40 cm. A secção considerada nesse estudo encontra-se entre dois elementos verticais a 6 m de distância da entrada do canal. Na Figura 2.18 para além da distribuição longitudinal da velocidade, são visíveis os vectores das correntes secundárias (V , W), na zona da junção há uma intensificação dessas mesmas correntes, com sentido ascendente até à superfície livre.

Na zona de vegetação emergente, há uma desaceleração da velocidade longitudinal, causando o desenvolvimento, em ambos os leitos, de vórtices de eixo longitudinal com grande intensidade comparados com os registados quando o escoamento decorre sem interferência de vegetação. Este facto indica que a vegetação emergente tem um papel importante na estrutura de escoamento em três dimensões, assim como na transferência de quantidade de movimento.

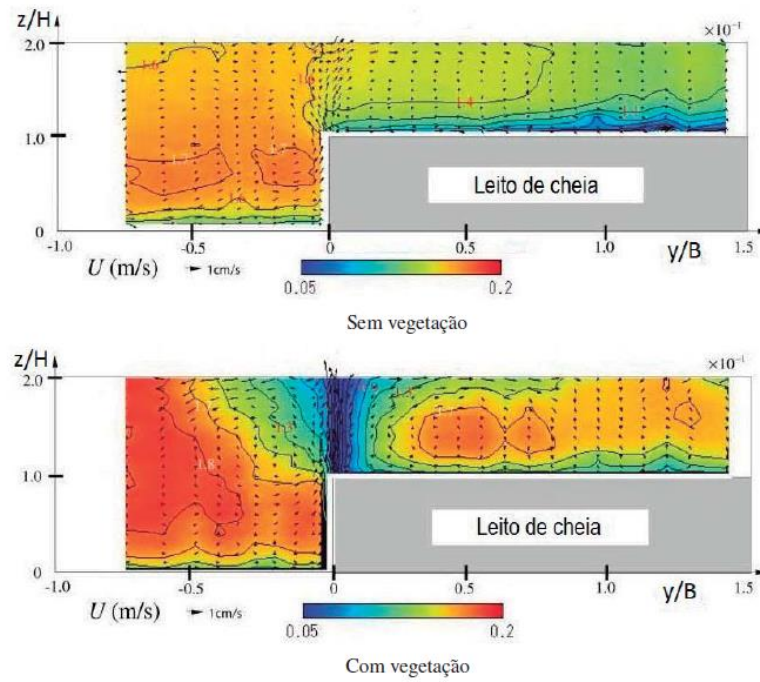


Figura 2.18 : Velocidade longitudinal e correntes secundárias (adaptada de Sanjou *et al.* 2011)

No que diz respeito à distribuição da tensão de Reynolds, a Figura 2.19 mostra o desenvolvimento transversal com e sem vegetação. Os valores $-\overline{u'v'}$ apresentados na figura referem-se à transferência de quantidade de movimento no plano horizontal. No caso em que não há vegetação é possível verificar que na proximidade da fronteira sólida do leito de cheia, os valores da tensão de Reynolds são representativos do gradiente vertical de velocidade longitudinal $\delta u/\delta y$.

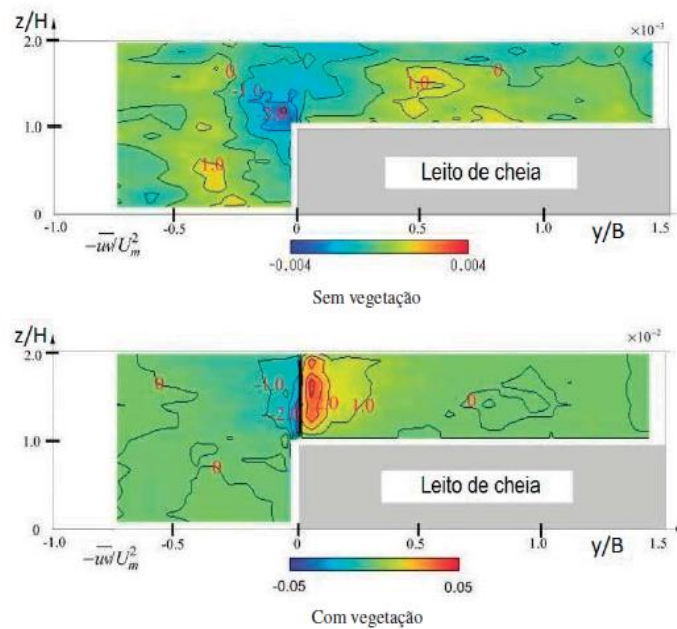


Figura 2.19 : Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} (adaptada de Sanjou *et al.* 2011)

O facto de haver um aumento de valores negativos na junção dos leitos tem especial importância, pois revelam a existência de vórtices de eixo vertical, que traduzem uma elevada transferência de quantidade de movimento entre ambos os leitos. A montante da vegetação aparecem valores positivos e negativos de tensão de Reynolds, este facto representa uma diferença significativa em relação à ausência de vegetação, esta variação de sinal implica que a transferência de quantidade de movimento é interrompida pela presença de vegetação na junção.

Sun & Shiono (2009) fizeram a caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta, tendo avaliado a influência da presença de vegetação emergente ao longo da fronteira do leito de cheia com o leito principal. Realizaram medições de velocidades longitudinais e tensões de arrastamento. Estas medições foram conduzidas num canal de 12 metros de comprimento e 0,306 m e largura, com geometria trapezoidal. Para a modelação da vegetação utilizaram hastes circulares de madeira com 9 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Testaram dois espaçamentos sendo o rácio entre o espaçamento e o diâmetro $e/d = 13,3$ para maior espaçamento e $e/d = 3,8$ correspondente ao menor espaçamento.

A Figura 2.20 mostra a velocidade normalizada u/u_m , medida sem vegetação emergente na junção e a três alturas relativas $hr = 0,24$, $hr = 0,37$ e $hr = 0,50$. A protuberância existente perto da fronteira sólida na zona onde o leito de cheia encontra o leito principal, é característica de escoamentos em secção composta, aumentando com o aumento de altura relativa, resulta de fortes correntes secundárias na interface e da elevada transferência de quantidade de movimento.

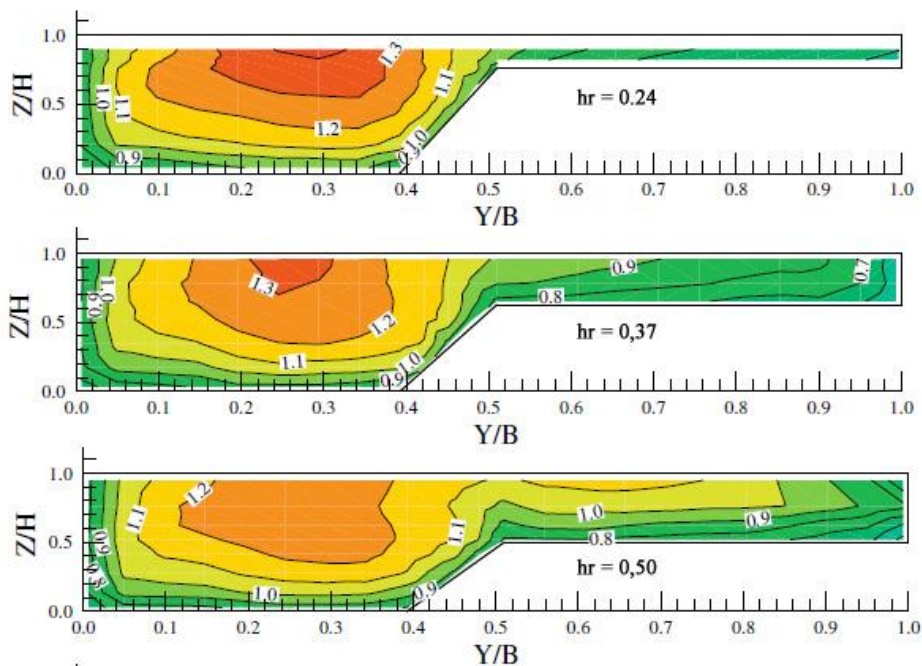


Figura 2.20: Velocidade longitudinal normalizada sem vegetação na junção (adaptada de Sun & Shiono 2009)

As velocidades apresentadas na Figura 2.21 são referentes ao ensaio conduzido com uma linha de vegetação emergente na interface, e com as mesmas alturas relativas. Pode-se visualizar uma diminuição da velocidade na zona onde se encontram as hastes, com o aumento da altura relativa esta diminuição de velocidade é mais acentuada. Há um aumento significativo da velocidade longitudinal no canal principal, isto deve-se não só às correntes secundárias como também à forte tensão transversal gerada pelo escoamento em torno das hastes.

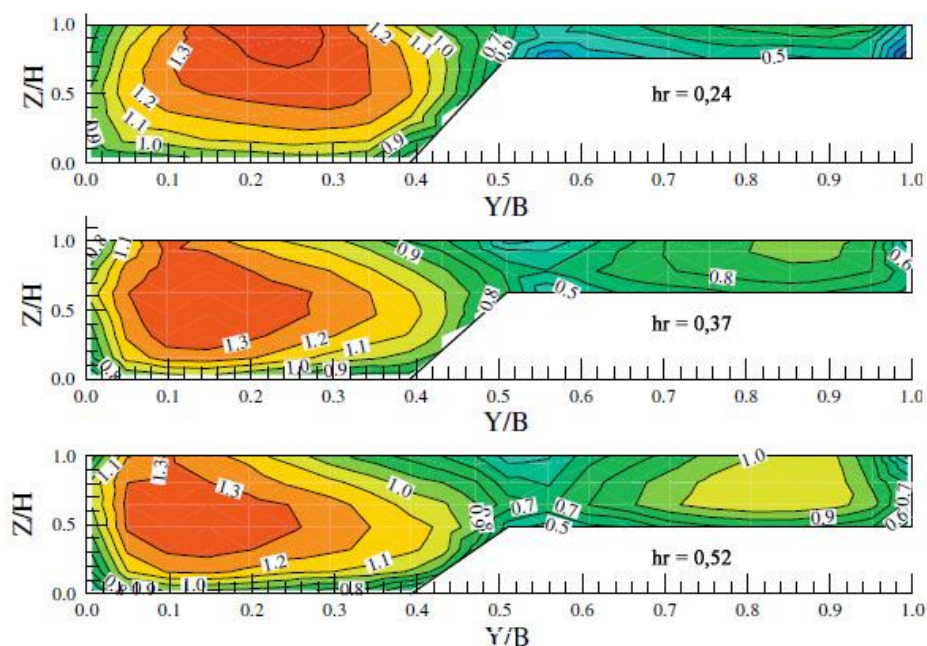


Figura 2.21: Velocidade longitudinal normalizada, $e/d = 13.8$ (adaptada de Sun & Shiono, 2009)

A Figura 2.22 mostra o comportamento da velocidade longitudinal quando o espaçamento entre as hastes é menor, passando para um rácio $e/d = 3.8$. Apesar de haver semelhanças no desenvolvimento da velocidade relativamente aos resultados obtidos quando o espaçamento é maior, é visível que as zonas onde ocorre a velocidade máxima, tanto no leito de cheia como no leito principal, deslocam-se ligeiramente na direcção das suas fronteiras físicas. Isto resulta essencialmente do aumento da tensão transversal provocado pela diminuição do espaçamento entre as hastes ao longo da linha de vegetação emergente.

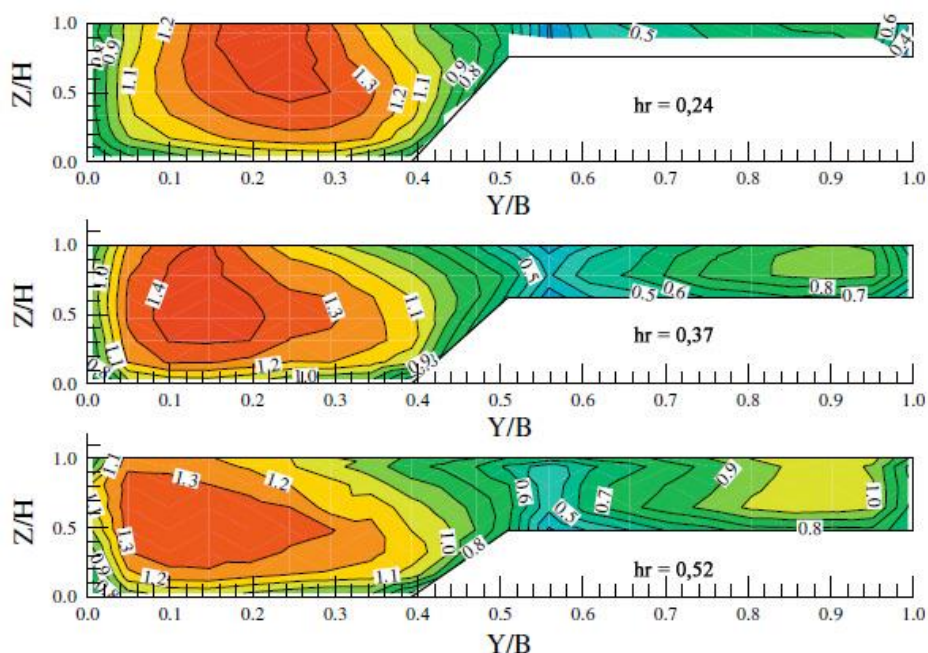


Figura 2.22: Velocidade longitudinal normalizada, $e/d = 3.8$ (adaptada de Sun & Shiono 2009)

Considerando que as medições foram efectuadas numa secção a 8,5 m da entrada do canal, e as medições com vegetação emergente foram realizadas ente duas hastes consecutivas, verifica-se que é nesta zona onde se regista a menor velocidade média em profundidade de toda a secção transversal, indicando que a presença das hastes dificulta a transferência de quantidade de movimento entre o canal principal e o leito de cheia.

3. Procedimento e instalação experimental

3.1. Canal de secção composta

Os resultados experimentais foram conduzidos num canal de secção composta. O canal em questão está localizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, com a denominação de Canal Veiga da Cunha. O canal de secção composta tem 10 metros de comprimento e 2 metros de largura. É constituído por betão polido na superfície e tem um declive longitudinal de 0,0011 m/m (Figura 3.1a).

O canal é alimentado por um reservatório que apresenta um nível de água constante de forma a evitar flutuações nas descargas. O reservatório localiza-se sensivelmente a uma altura de 4 metros e é abastecido por duas bombas com capacidade de 100 l/s. Do reservatório a água escoava-se por duas tubagens independentes, estas alimentam separadamente o leito de cheia e o leito principal. Cada circuito está equipado com uma válvula de seccionamento e com um medidor de caudal que regulam a descarga de cada subsecção.

Para garantir uma alimentação independente em cada subsecção, colocaram-se duas placas verticais de metal nos primeiros 50 cm após a entrada dos caudais, permitindo o início do desenvolvimento da camada limite em cada subsecção. Foram colocados também elementos a montante das primeiras secções do canal de forma a tranquilizar o escoamento nas subsecções e estabilizar a superfície livre. Estes elementos tranquilizadores estão identificados na Figura 3.1b e consistem em tijolos cerâmicos e tubos de plástico empilhados a montante do canal, duas chapas metálicas conforme descrito anteriormente, uma placa de contraplacado marítimo no começo do leito principal e três placas de poliestireno. A posição vertical da placa de contraplacado marítimo é regulável, e as placas de poliestireno tem liberdade de se movimentar verticalmente. No final do canal foram colocadas três comportas independentes entre cada subsecção com a finalidade de ajustar as alturas de água (Figura 3.1c). A introdução destes elementos seguiu as indicações recomendadas por Bousmar *et al.* (2005) para o correcto estabelecimento do regime uniforme.

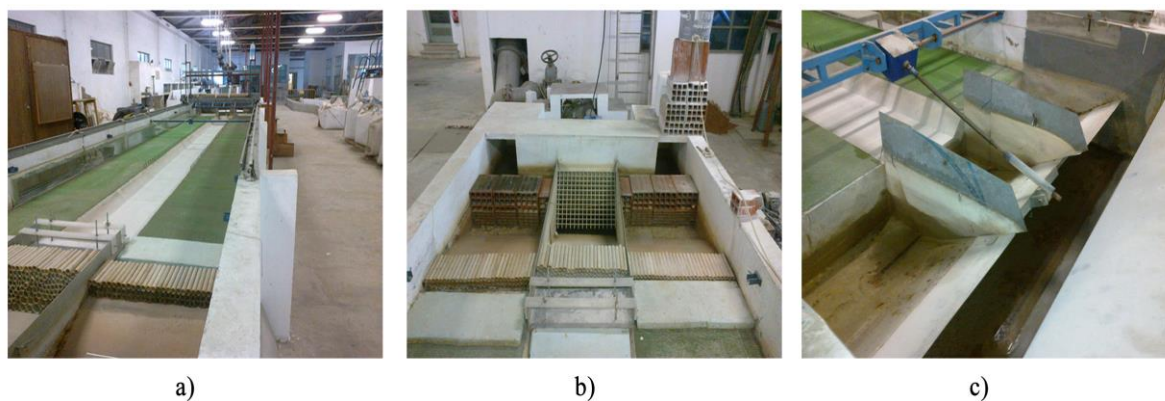


Figura 3.1 (a) Canal de secção composta, (b) Elementos de estabilização do escoamento e (c) Sistema de comportas

A secção transversal do canal é simétrica, composta por um leito principal trapezoidal, com largura total de 0,6 metros com 45° de declive na zona dos taludes, e dois leitos de cheia com 0,7 metros de comprimento. Na Figura 3.2 as variáveis h_{LP} e h_{LC} representam a altura de escoamento do leito principal e a altura de escoamento do leito de cheia.

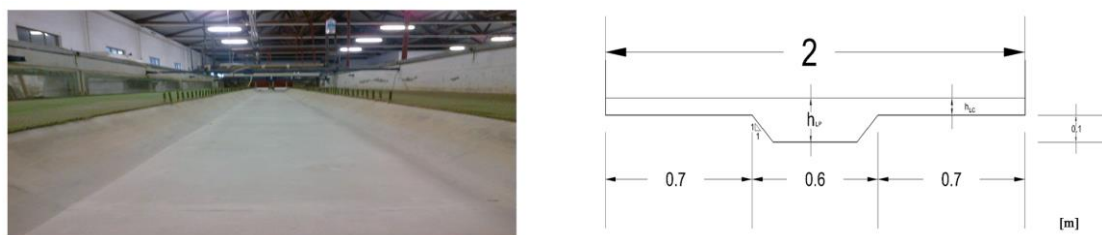


Figura 3.2: Representação esquemática da secção transversal

O canal de secção composta Veiga da Cunha é feito de betão polido à superfície com coeficiente de Manning de $0,0092 \text{ s.m}^{-1/3}$, para uma melhor caracterização do escoamento em torno de vegetação, optou-se por introduzir tapetes de relva sintética com 5 mm de espessura ao longo do desenvolvimento longitudinal e transversal dos leitos de cheia. A introdução dos tapetes de relva sintética traduz-se num aumento do valor do coeficiente de Manning médio para um valor de $0,0172 \text{ s.m}^{-1/3}$, e permite que a estrutura do escoamento se desenvolva ao longo de leitos de cheia rugosos (Fernandes, 2013).

Para além da relva sintética para simular a presença de vegetação foram introduzidos elementos artificiais na interface com o leito principal. A escolha desses elementos foi feita com objectivo de representar da melhor maneira a vegetação ripícola mediterrânica característica (Rodrigues 2012).

Neste estudo foram testados dois tipos de elementos artificiais. O primeiro consiste num elemento rígido, parcialmente submerso composto por um cilindro central com 6 mm de diâmetro e 45 mm de altura a que se agregou uma densa copa ramificada com formato esférico, sendo o seu diâmetro aproximadamente de 90 mm. O segundo elemento utilizado é o cilindro central utilizado para suportar a copa mas sem a presença da esfera ramificada. A Figura 3.3 ilustra os dois elementos verticais escolhidos para simular vegetação ripícola.



Figura 3.3: Elementos verticais utilizados para simular vegetação na interface dos leitos.

Os elementos verticais encontram-se afixados à estrutura do canal e estão localizados na fronteira dos leitos de cheia com o leito principal. A disposição dos elementos verticais ao longo do canal de secção composta pode ser definida pela distância entre dois elementos consecutivos, e , ou pelo rácio entre o espaçamento e e o diâmetro d . Para o presente estudo foi escolhido um $\frac{e}{d} = 19$ em concordância com estudos realizados anteriormente, nomeadamente por Shiono *et al.* (2009) de modo a que a configuração dos elementos verticais fosse representativa e se adequasse à realidade (Rodrigues, 2012).

3.2. Equipamentos de medição e controlo

Apesar de haver um caudal independente no canal principal e nos leitos de cheia, a alimentação provém do mesmo reservatório. De forma a garantir uma alimentação independente a tubagem que provém do reservatório é separada em duas, uma para os leitos de cheia e a segunda para o leito principal. De modo a controlar o caudal que é introduzido no canal, dois medidores electromagnéticos de caudal, chamados de caudalímetros, procedem à medição volumétrica da água. A alimentação é controlada por meio de válvulas de seccionamento, e um monitor digital informa a quantidade de água que se está a abastecer. Como o abastecimento dos dois leitos de cheia é feito por uma única tubagem, o caudal introduzido no canal é dividido equitativamente pelos dois leitos. A Figura 3.4 ilustra os equipamentos de medição existentes no canal.



Figura 3.4: Equipamentos de controlo de Caudal

As paredes do canal estão providas de calhas que permitem o deslocamento longitudinal numa plataforma nelas apoiada. Para a medição das alturas de água dois hidrómetros, um em cada leito, foram afixados à plataforma de modo a permitir o deslocamento dos mesmos na direcção

transversal. O equipamento de medição utilizado para medir os valores de velocidade também foi fixo à plataforma da mesma maneira dos hidrómetros (Figura 3.5).



Figura 3.5: Modo de fixação dos hidrómetros e do Velocímetro (Retirada de Rodrigues 2012)

Para a medição das velocidades utilizou-se um medidor acústico Doppler (ADV) denominado de vectrino (Figura 3.6)



Figura 3.6: Vectrino, medidor acústico Doppler (ADV) (www.nortek.no)

O Vectrino é um velocímetro acústico de alta resolução utilizado, para medições de velocidade da água em 3D, permite o estudo de flutuações na velocidade. O sensor acústico possui um transdutor transmissor e quatro receptores (cf. Figura 3.7). O ponto de amostragem é localizado longe do sensor para fornecer medições sem interferência. Velocímetros Doppler acústicos funcionam enviando um pulso acústico curto a partir de um transmissor. Quando o pulso atravessa o ponto de foco dos feixes receptores, o eco é gravado em cada receptor acústico. O eco é então processado para encontrar o efeito Doppler, a escala é ajustada com a medição da velocidade do som no líquido, e o vector de velocidade é registado na memória interna e transmitido para um PC.

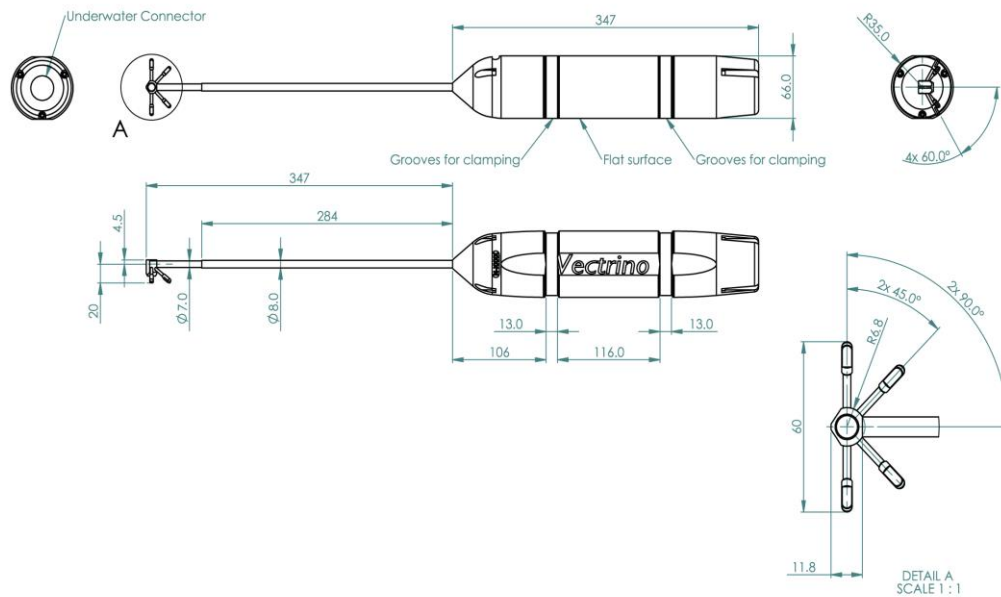


Figura 3.7: Dimensões do Vectrino (www.nortek.no)

Para aumentar a qualidade da medição e para melhorar o sinal acústico introduziu-se por meio de uma mangueira ligada a um reservatório a montante uma mistura de pó de sílica com água (cf. Figura 3.8). Esta mistura aumenta a concentração de partículas suspensas na água melhorando a qualidade da medição. Tendo em conta os resultados obtidos em Fernandes (2013) sobre a avaliação da influência da introdução da mistura de pó de sílica no escoamento, no estudo que aqui se apresenta assumiu-se que a velocidade a que as partículas se deslocam na água é a mesma do escoamento. A mangueira apoia-se numa barra transversal ao canal localizada na secção $X = 5$ m, podendo-se movimentar transversalmente, de modo a alinhar-se com o ponto de amostragem do vectrino.



a)



b)

Figura 3.8 Introdução do pó de sílica, a) aplicação do pó de sílica através da mangueira e b) Reservatório

3.3. Procedimento experimental

Os resultados experimentais deste estudo foram obtidos num regime de escoamento uniforme. Muito embora este regime não seja comum em situações reais, ele permite a comparação de resultados entre escoamentos com configurações diferentes. Para que a distribuição de caudais entre o leito principal e os leitos de cheia decorra em regime uniforme é necessário proceder a algumas verificações.

O procedimento que foi utilizado para atingir o regime uniforme trata-se de um processo iterativo e começa com a definição dos caudais a introduzir, que seguem as directrizes do método proposto em Lambert & Myers (1998).

Após a introdução dos primeiros caudais procura-se estabilizar os níveis de água mediante o ajuste das comportas existentes no fim do canal. Para verificar se a calibração dos caudais com a posição das comportas se traduz numa altura de água constante ao longo do canal fazem-se medições, com auxílio de um hidrómetro, em 6 pontos de cada uma das secções transversais $X = 4$ e $X = 8,5$ m. Se a diferença entre a média dos seis pontos medidos a montante com a média dos seis pontos medidos a jusante for inferior a 1mm procede-se ao cálculo do caudal que realmente atravessa cada uma das secções, através da integração das velocidades na área de cada subsecção. Analisa-se a diferença de caudais calculados para cada secção, se esta for inferior a 0.1 l.s^{-1} considera-se que se atingiu o regime uniforme.

Caso contrário altera-se o caudal imposto para o valor calculado na secção mais a montante pelo método da integração das velocidades e repete-se todo o processo até que a diferença entre caudais seja inferior a 0.1 l.s^{-1} (Figura 3.9)

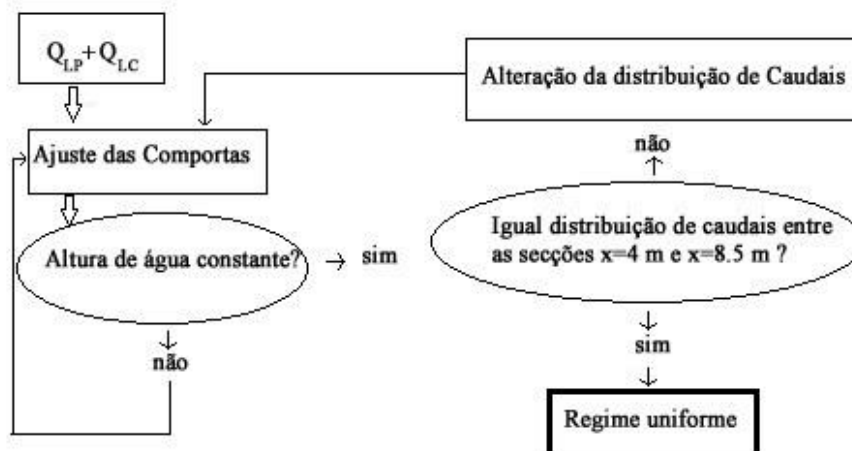


Figura 3.9: Procedimento experimental

Depois de atingido o regime uniforme para cada ensaio procede-se à medição da velocidade. Para conduzir as medições no canal, e tirando partido da simetria do mesmo mediram-se apenas pontos até à metade do canal. Estas medições respeitam uma malha de pontos distribuídos pela secção transversal. A malha consiste em 22 pontos, dispostos em três posições verticais (40 %, 60% e 80% da altura de escoamento do leito de cheia) estendendo-se até ao leito principal, e sete posições verticais que se encontram apenas no leito principal (10%, 20%, 40% e 60% da

altura do leito principal). Posto isto a malha utilizada consiste em 102 pontos em que cada um deles tem um tempo de medição de 3 minutos.

As medições foram conduzidas em seis secções transversais entre dois elementos verticais consecutivos na proximidade da secção $X = 7,5$ m. A malha de medição utilizada está representada na Figura 3.10.

Cinco alturas relativas foram testadas para dois tipos de elementos verticais. Em todas as alturas relativas os leitos de cheias estavam cobertos de relva sintética. Os resultados da velocidade média no tempo, da distribuição da velocidade média em profundidade e das tensões de Reynolds são apresentados no Capítulo 5.

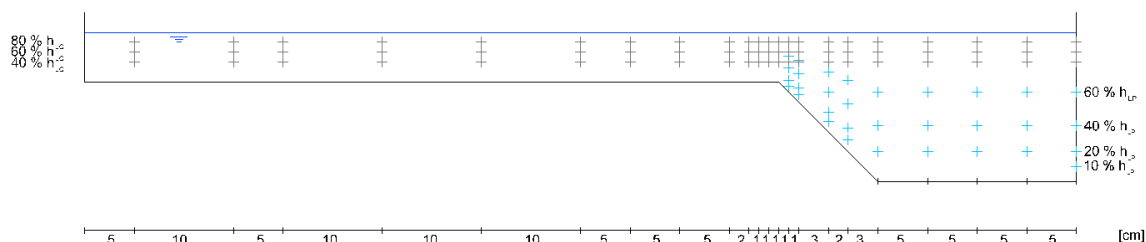


Figura 3.10: Malha de medição adoptada nas secções transversais

Para uma melhor caracterização do escoamento em torno dos elementos verticais, as medições foram realizadas em seis secções transversais entre dois elementos verticais consecutivos. Nas secções $X = 7.470$ m, $X = 7.500$ m e $X = 7.530$ m as medições foram efectuadas conforme a malha da Figura 3.10. Nas secções $X = 7.455$ m, $X = 7.485$ m e $X = 7.515$ m apenas foram medidos os pontos que se encontram próximos da interface do leito de cheia com o leito principal. A Figura 3.11 apresenta a vista em planta dos pontos medidos para as seis secções.

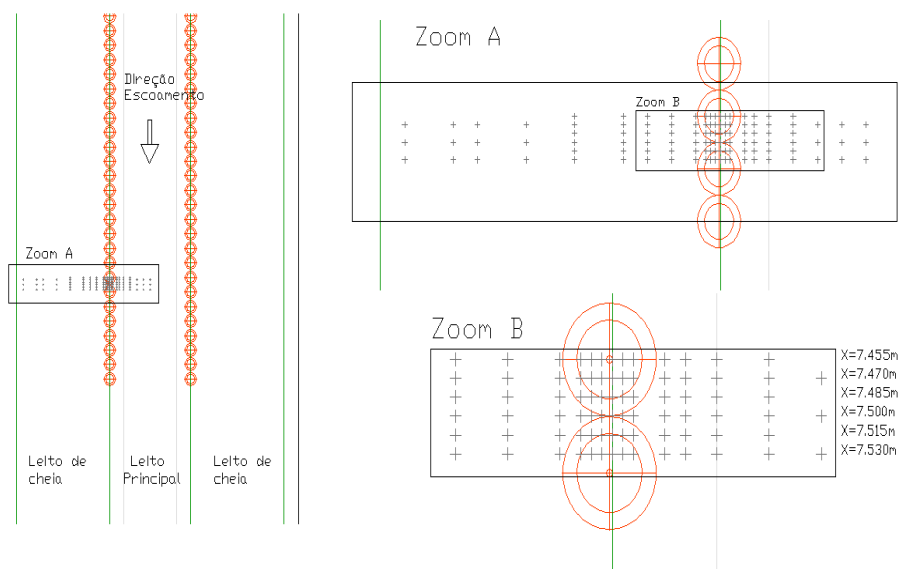


Figura 3.11: Malha de medição em planta

Para harmonizar os dados recolhidos pelo medidor acústico doppler com a posição geométrica no canal foi adoptado o sistema de coordenadas apresentado na Figura 3.12 para o canal experimental. No qual as variáveis x , y e z representam as direcções longitudinal, lateral e vertical respectivamente. Tendo a sua origem na intercepção da parede lateral esquerda com a superfície do leito principal e a primeira secção imediatamente a seguir às placas tranquilizadoras.

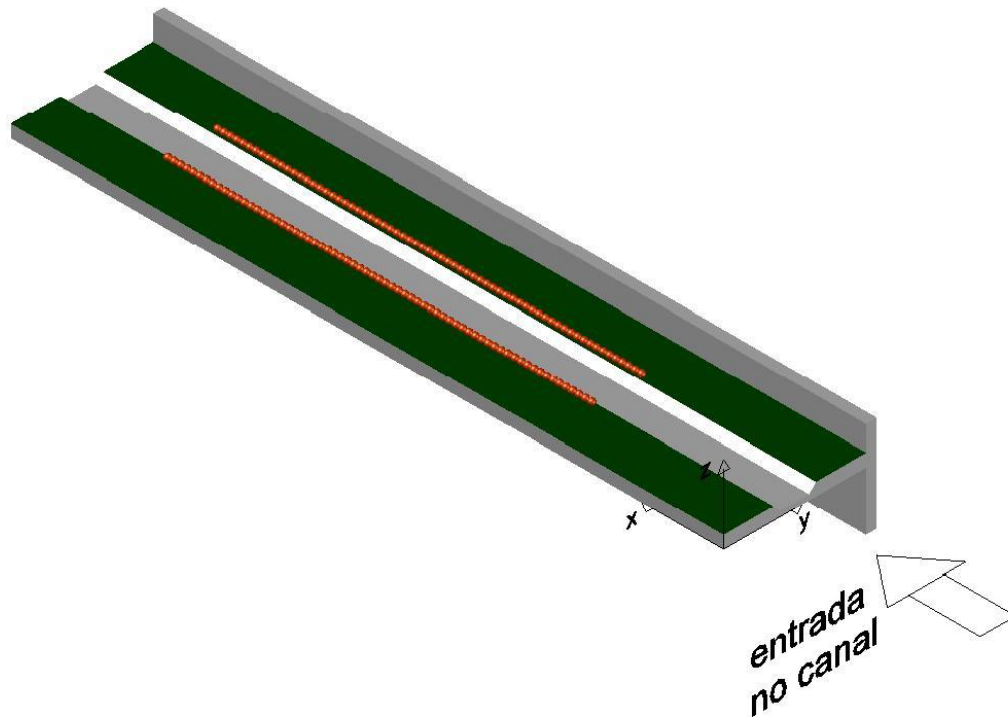


Figura 3.12: Sentido positivo dos eixos adoptados

Nas medições realizadas com árvores na interface houve necessidade de rodar 180° o vectrino sobre o seu eixo vertical, devido à impossibilidade de medir os pontos da malha que se encontram nas posições $y = 0,67\text{m}$, $y = 0,68\text{m}$, $y = 0,69\text{m}$. Nestes pontos o ponto de foco dos receptores era interceptado pela haste da árvore ou pela ramificação da mesma.

Quando os elementos verticais são troncos o problema apenas surge nos pontos que se encontram na posição $y = 0,68$. Devido às complicações inerentes à rodagem do vectrino e a forte possibilidade de danificar o equipamento nesse processo, optou-se por não rodar o aparelho não considerando os pontos em questão.

4. Ensaaios e processamento de dados

4.1. Caracterização dos ensaios

Para caracterizar o escoamento em torno da vegetação nas margens do canal Veiga da Cunha, incluíram-se os dados experimentais recolhidos em Rodrigues (2012), uma vez que a caracterização experimental apresentada nesta dissertação tem como base um trabalho contínuo realizado neste mesmo canal. A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos dados experimentais utilizados, identificando as medições no âmbito deste estudo com um **S**, e as medições realizadas em Rodrigues (2012) com um **R**.

Tabela 4.1 : Resumo das medições consideradas

hr	Elementos Verticais	x = 7,455 m	x = 7,470 m	x = 7,485	x = 7,500 m	x = 7,515 m	x = 7,530
0,15	Arvores	S	<i>R</i>	S	<i>R</i>	S	<i>R</i>
0,20	Arvores	S	<i>R</i>	S	<i>R</i>	S	<i>R</i>
	Troncos	S	S	S	S	S	S
0,30	Arvores	S	<i>R</i>	S	<i>R</i>	S	<i>R</i>
	Troncos	S	S	S	S	S	S

S – Medição realizado no âmbito deste estudo

R – Medição realizada em Rodrigues (2012)

Para uma melhor visualização dos dados experimentais recolhidos para o presente estudo, a Figura 4.1 complementa a informação da Tabela 4.1, ilustrando também as condições de escoamento testadas.

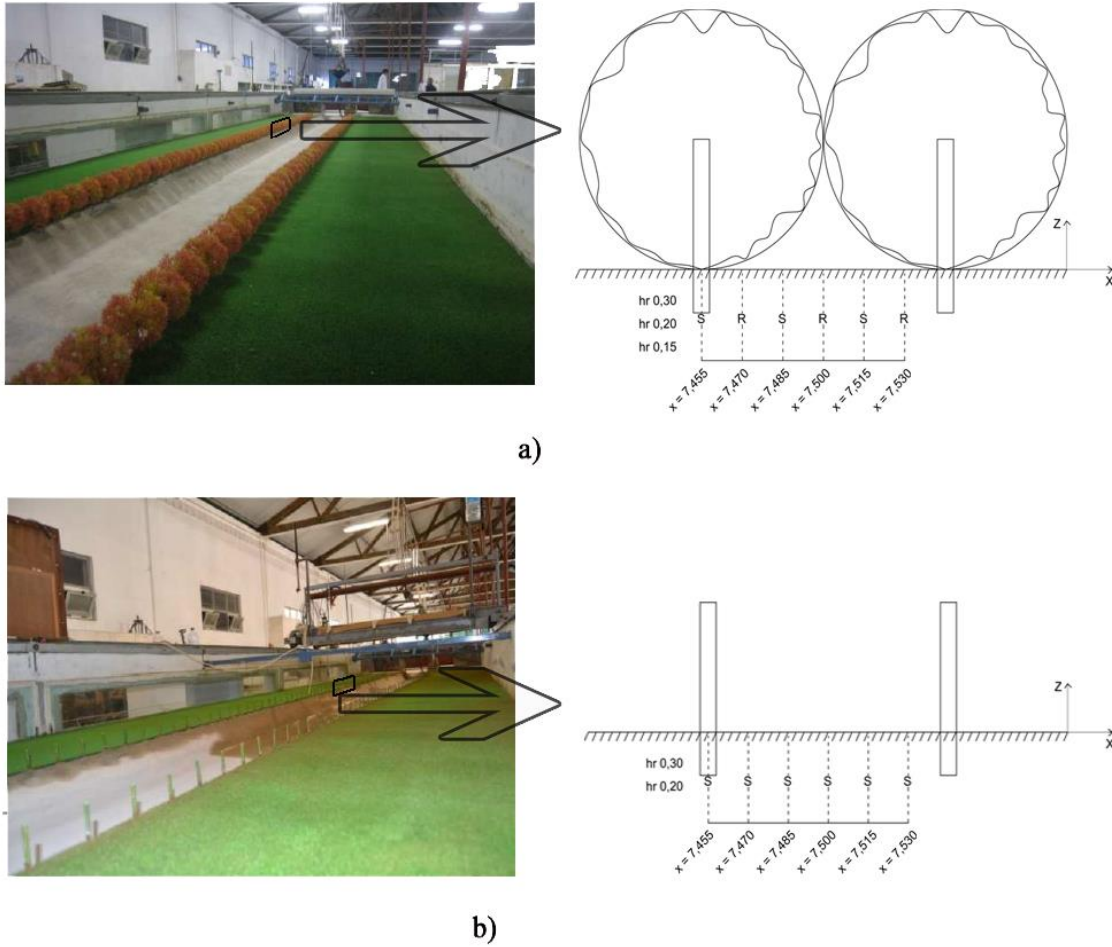


Figura 4.1: Medições efectuadas na proximidade da secção $x = 7500$, com relva sintética no leito de cheia e a) elementos verticais com folhagem b) elementos verticais sem folhagem

S – Medição realizado no âmbito deste estudo

R – Medição realizada em Rodrigues (2012)

Interessa realçar que todos os dados recolhidos seguem o mesmo procedimento experimental, permitindo dessa maneira efectuar uma análise da influência no escoamento do tipo de vegetação existente na interface, através da comparação entre as medições realizados com elementos verticais com folhagem e sem folhagem.

A Tabela 4.2 sumariza as medições realizadas, dividindo-as em cinco grupos, tendo todos em comum a condição de escoamento uniforme. O regime uniforme foi atingido conforme o descrito em 3.3, de forma a garantir uma altura de escoamento e uma distribuição de caudal constantes ao longo das secções do canal. Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores das variáveis mais importantes, onde Q_{LC} e Q_{LP} dizem respeito ao valor do caudal escoado no leito principal e no leito de cheia respectivamente. A altura relativa entre os dois leitos identificada por hr e h_{LP} informa sobre a altura do escoamento no leito principal. O número de Froude e o numero de Reynolds, sendo $Fr = U_i \frac{U_i}{\sqrt{gh_i}}$ e $Re = \frac{4U_i R_i}{\nu}$, onde U_i e R_i são a velocidade média e o raio hidráulico de uma subsecção i e ν representa a viscosidade cinemática. As medições realizadas com vegetação artificial na interface foram conduzidas com relva sintética a cobrir o leito de cheia, e duas alturas relativas foram testadas na presença de troncos artificiais (hr020rt, hr030rt) e três alturas relativas com árvores artificiais na interface (hr015ra, hr020ra, hr030ra).

Tabela 4.2: Condições hidráulicas de escoamento

Nome	h_{LP} (m)	h_r (-)	Q_{LP} (l.s ⁻¹)	Q_{LC} (l.s ⁻¹)	Re_{LP} (x10 ⁻⁵)	Re_{LC} (x10 ⁻⁵)	Fr_{LP} (-)	Fr_{LC} (-)
hr015ra	0,1173	0,15	34,90	1,60	2,58	0,05	0,18	0,05
hr020ra	0,1244	0,20	36,10	3,80	2,67	0,11	0,17	0,07
hr030ra	0,1428	0,30	39,30	11,70	2,90	0,32	0,14	0,10
hr020rt	0,1264	0,20	38,30	5,00	2,83	0,14	0,17	0,09
hr030rt	0,1419	0,30	41,30	14,90	3,05	0,40	0,15	0,13

4.2. Recolha e tratamento de dados

As medições realizadas no âmbito deste estudo, utilizaram como instrumento de medição um medidor doppler acústico (ADV). Surge então a necessidade de compreender o processo que começa com a recolha de dados in-situ pelo ADV e culmina com a recolha e apresentação dos dados de velocidade considerados em cada ponto da malha de medição utilizada (Figura 3.10).

A recolha de dados tem a sua origem na medição in-situ efectuado pelo doppler acústico, os dados recolhidos e processados pelo software do dispositivo denominado de Vectrino (Figura 4.2). Após a recolha de dados é gerado um ficheiro com extensão .VNO, que contem cerca de 18000 amostras de valores instantâneos de velocidade nas três direcções X,Y e Z, recolhidas num período de três minutos, a uma frequência de 100 Hz para cada ponto da malha.

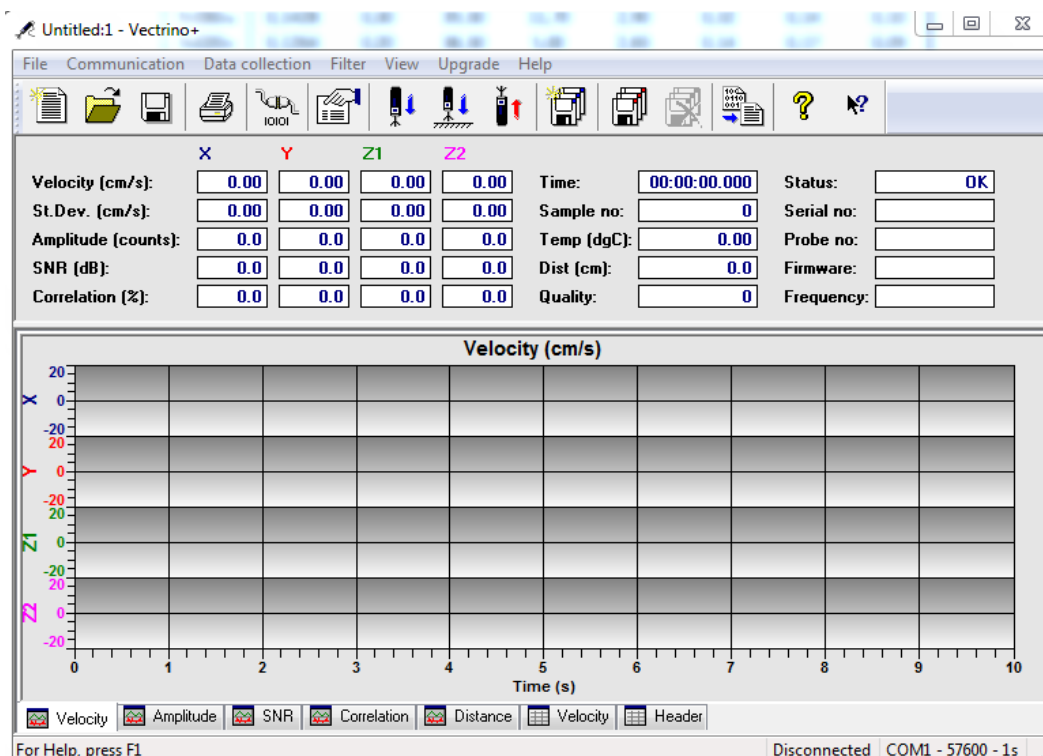


Figura 4.2 : Layout do Software Vectrino onde se realizou a recolha e o processamento de dados.

As amostras recolhidas pelo ADV medem a velocidade das partículas dispersas no escoamento. Para que as amostras recolhidas representem com precisão a velocidade do escoamento, é

necessário que estas sejam acompanhadas de uma medição da mudança de fase entre a saída e a entrada do impulso. Considerando como amostra valida todas aquelas em que a amplitude do impulso esteja contida no intervalo de -180° a $+180^\circ$ (Wahl, 2003).

Tendo em conta que o ficheiro .VNO que resulta da medição in-situ contém todas as amostras, incluindo aquelas em que o impulso se encontra fora do intervalo (picos de medição), é necessário proceder à filtragem das amostras recolhidas.

Para filtrar as amostras recolhidas, utilizou-se um software denominado de WinADV, desenvolvido por Wahl (2003), que através de um algoritmo modificado identifica os picos de medição como sugerido em Goring & Nikora (2002), e procede à sua remoção.

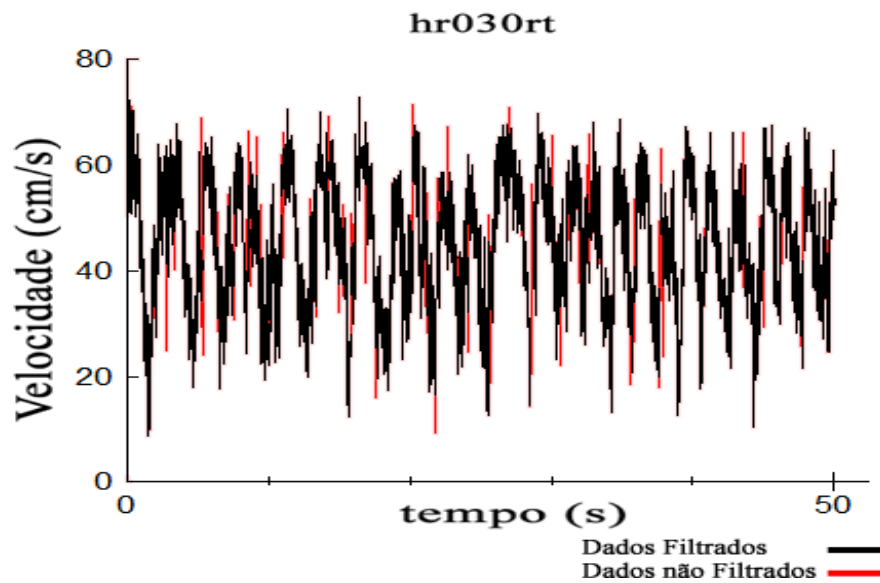


Figura 4.3 : Aplicação do filtro Goring e Nikora modificado em Wahl (2003) na secção transversal X = 7500 para $hr = 0,30$

A Figura 4.3 ilustra a aplicação do filtro Goring & Nikora (2002) modificado em Wahl (2003), na série temporal da velocidade longitudinal para o ponto Y = 0,72 m a 40% da altura de água do leito principal. Depois de filtrados os dados de todos os pontos da malha o programa gera um ficheiro com extensão .ADV que permite que as amostras de todos os pontos sejam exportadas para uma folha de dados.

4.3. Integração dos dados das velocidades e determinação dos valores médios em profundidade

Tendo em conta que num dado sistema não há criação nem destruição de matéria, a massa de um fluido incompressível que entra num volume fixo tem de ser igual á massa que sai desse mesmo volume, e considerando que o escoamento decorre em regime uniforme, é necessário calcular o caudal que é efectivamente escoado, de modo a garantir a lei da conservação da massa ao longo do canal. Para tal efeito define-se a velocidade média em profundidade.

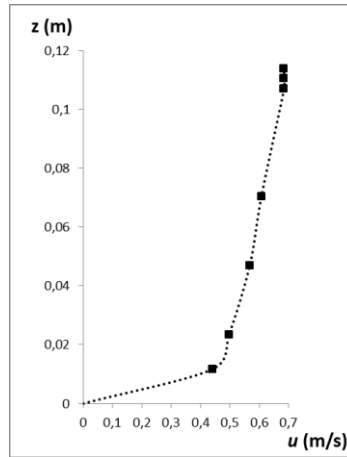


Figura 4.4: Perfil vertical da velocidade na posição $y = 0,85$ m para $hr015$

Para a obtenção dos valores médios em profundidade é efectuada a integração do perfil vertical da velocidade em todas as posições do eixo y da malha de medição (Figura 4.4), através da seguinte equação:

$$U_d = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{u}(z) dz \quad 4.1$$

Onde \bar{u} representa a velocidade média ao longo do tempo e H a altura local do escoamento. Determinadas as velocidades em profundidade, divide-se a secção em segmentos verticais, de modo a que a cada posição no eixo y corresponda uma largura δy . Multiplicando δy pela altura de escoamento obtém-se a área da secção recta ΔS (Figura 4.5).

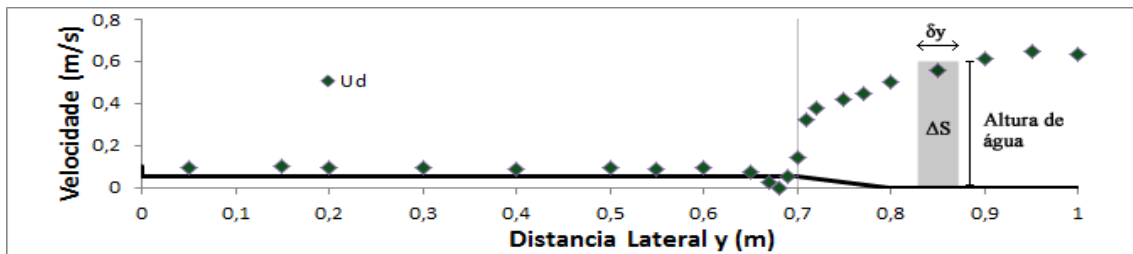


Figura 4.5: Esquematização da integração realizada para cálculo de caudal escoado na secção recta referente ao ponto $y = 0,85$ para $hr015$

O produto da velocidade média em profundidade pela sua área de influência representa o caudal volumétrico que passa nesse plano como demonstra a equação 4.2. Somando os caudais de cada área, obtém-se o caudal total que atravessa toda a secção transversal (Massey, 2002).

$$Q = U_d \times \Delta S \quad 4.2$$

Tendo em conta este método da integração dos dados das velocidades, podemos calcular os caudais que atravessam as secções onde se recolheram os dados, e compara-los com os caudais impostos pelos caudalímetros.

Na Tabela 4.3 apresentam-se os caudais calculados através da integração das medições pontuais, os caudais impostos a montante, o factor de correcção que representa o rácio entre o caudal imposto e o caudal calculado, e o erro expresso em percentagem.

Tabela 4.3 : Comparação entre o Caudal Calculado e o Caudal Imposto

Elementos Verticais	Altura Relativa (-)	Caudal Calculado Q_c (l/s)	Caudal Imposto Q_i (l/s)	Factor de correção (-)	Diferença percentual ξ (%)
Árvores	0,15	35,1	36,5	1,039	3,77
	0,20	38,8	39,9	1,030	2,90
	0,30	48,7	51	1,043	4,11
Troncos	0,20	43,93	43,30	1,015	1,45
	0,30	51,54	56,20	0,917	8,29

$$\text{Factor de Correção} - Fr = \frac{Q_i}{Q_c}$$

$$\text{Erro} - \xi = \frac{|Q_i - Q_c|}{Q_i} \times 100$$

Podemos verificar que o factor de correcção está sempre contido no intervalo $[0,9; 1,1]$, o erro entre o caudal imposto e o caudal calculado pelo método da integração das velocidades não supera os 10%, podendo assim afirmar que as medições de velocidade recolhidas correspondem a velocidade do escoamento.

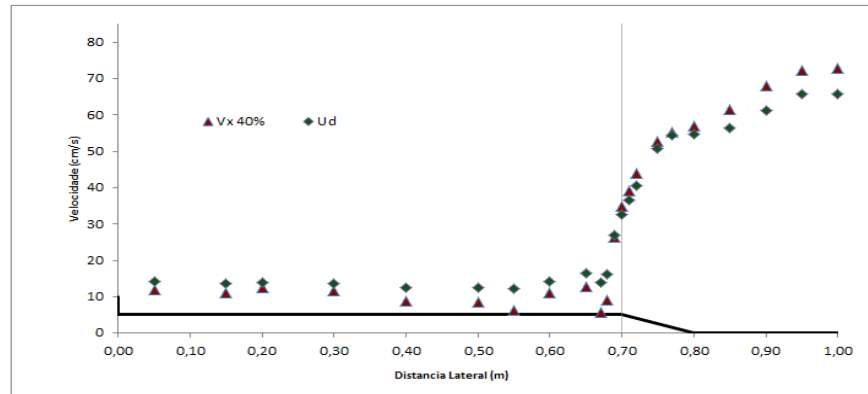
Contrariamente ao verificado por Duarte (2011) quando a configuração dos leitos de cheia do canal Veiga da Cunha é rugoso e o leito principal liso, quando existem elementos verticais com folhagem na interface, a velocidade média em profundidade não é coincidente com a distribuição transversal da velocidade medida a 40% da altura do leito de cheia (Rodrigues 2012).

A Figura 4.6 apresenta a comparação dos valores da velocidade médios em profundidade segundo o método de integração e a distribuição transversal da velocidade medida a 40% da altura do leito de cheia, na secção $X = 7500$ quando os elementos verticais são troncos para as duas alturas relativas testadas, $hr = 0,20$ e $hr = 0,30$.

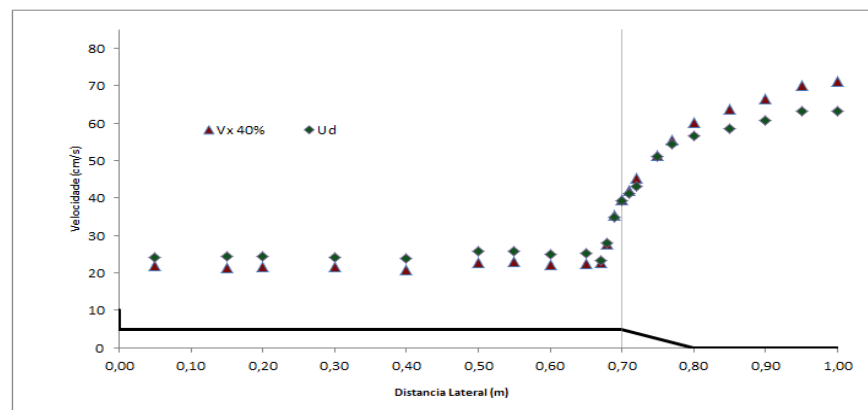
Assim como verificado quando os elementos verticais são árvores, a velocidade média em profundidade não é igual à distribuição transversal da velocidade longitudinal medida a 40% da altura de água ao longo do desenvolvimento transversal do leito de cheia. Como seria de esperar a maior rugosidade dos leitos de cheia com troncos na interface não permite que se reduza a malha de medição aos pontos correspondentes a 40% da altura de água no leito de cheia como é admissível para canais de secção composta lisos.

No que diz respeito aos valores das tensões de Reynolds e das componentes de flutuação média em profundidade, estas seguem o mesmo método da integração, substituindo na equação 4.1 a velocidade média no tempo \bar{u} , pelos respectivos valores de tensões e flutuação da velocidade. A determinação dos valores de distribuição média em profundidade das tensões de Reynolds τ_{xy}^d fez-se com recurso à seguinte equação:

$$\tau_{xy}^d = \frac{1}{H} \int_0^H -\rho \overline{u'v'}(z) dz \quad 4.3$$



a)



b)

Figura 4.6 : Comparação entre a distribuição da velocidade longitudinal a 40 % da altura de água e a velocidade média através do método de integração em profundidade quando os elementos verticais são troncos, a) $hr = 0,20$ e b) $hr = 0,30$

5. Caracterização do escoamento em canais de secção composta com elementos verticais na interface

5.1. Introdução

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados experimentais recolhidos no canal Veiga da Cunha em fundo rugoso, para três alturas relativas 0,15, 0,20 e 0,30. Os resultados permitem uma avaliação da influência da vegetação artificial na estrutura do escoamento. Dois tipos de vegetação foram estudadas, árvores e troncos tal como foi descrito em 3.1. Conduziram-se medições em 6 secções transversais por cada altura relativa para cada uma das configurações de elementos verticais artificiais. As diferenças nas distribuições de velocidade longitudinal e tensões de Reynolds devido aos dois tipos de vegetação são também avaliadas.

No subcapítulo 5.2 apresentam-se os resultados das distribuições das velocidades longitudinais e das tensões de Reynolds quando os elementos verticais na interface são árvores para as alturas relativas de 0,15, 0,20 e 0,30. Ao passo que no subcapítulo 5.3, as distribuições de velocidades e de tensões para alturas relativas de 0,20 e 0,30 tem troncos como elementos verticais. No último subcapítulo comparam-se os resultados obtidos com as duas configurações, avaliando-se a influência das mesmas na estrutura de escoamento.

Nas seguintes subsecções serão apresentados os resultados da velocidade média no tempo recorrendo a isolinhas, normalizadas pela velocidade média na secção U_s , acompanhados pela distribuição transversal da velocidade média em profundidade nas respectivas secções. Assim como a distribuição em planta da velocidade em concordância com a malha de medição da Figura 3.11.

No que diz respeito às tensões de Reynolds apresentam-se as tensões horizontais (τ_{xy}). Assim como os resultados de velocidade longitudinal, as tensões de Reynolds são apresentadas sob a forma de isolinhas e distribuição transversal da tensão média em profundidade.

5.2. Caracterização do escoamento em canais de secção composta com elementos verticais na interface - árvores

As distribuições das velocidades apresentadas dizem respeito às secções $X = 7.455$, $X = 7.470$, $X = 7.485$, $X = 7.500$, $X = 7.515$ e $X = 7.530$ para as alturas relativas de 0,15, 0,20 e 0,30. Para hr 0,15 apenas foram testadas árvores, este facto deve-se essencialmente a dois motivos consequentes de uma altura de água muito baixa no leito de cheia. O primeiro tem a ver com a dificuldade em medir as velocidades, principalmente nos pontos da malha mais próximos da superfície. Nestes pontos as hastes do vectrino ficam à tona de água emergindo inúmeras vezes ao longo do tempo de medição, devido ao movimento turbulento do escoamento. O segundo motivo prende-se com a reduzida interacção entre o escoamento e a folhagem nas árvores. A Figura 5.1 evidencia a reduzida influência da folhagem das árvores no escoamento do leito de cheia para a altura relativa de 0,15 em relação as restantes alturas testadas. Face aos motivos referidos e visto que a diferença nos resultados para esta configuração entre elementos verticais não iria ser significativa optou-se por não realizar as medições com troncos.

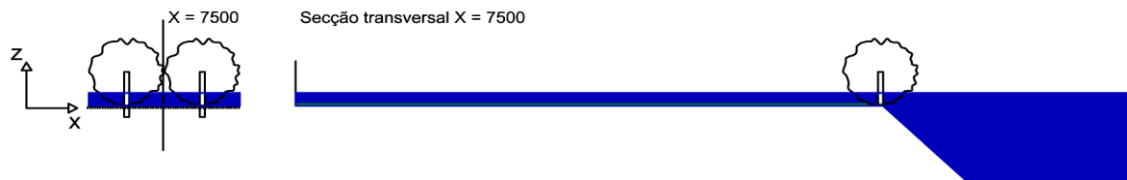


Figura 5.1: Altura do escoamento em hr015

Distribuição das velocidades

A Figura 5.2 apresenta a distribuição de velocidade longitudinal média no tempo assim como a distribuição transversal da velocidade média em profundidade para a altura relativa de 0,15 e com árvores na interface.

Pode-se verificar que os padrões de velocidade são fortemente influenciados pela presença de vegetação. Tanto na velocidade longitudinal média no tempo, como na distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade, os valores aproximam-se de zero na proximidade da vegetação. Ao contrário do verificado por Duarte (2011), para fundo liso e fundo rugoso em que a distribuição transversal da velocidade longitudinal apresenta uma forma semelhante a um “S”, a velocidade praticamente nula na proximidade das árvores altera a forma da distribuição de velocidades, aparecendo um vértice acentuado na zona onde se encontram os elementos verticais (cf. Sun & Shiono 2009). A presença deste vértice ao longo das seis secções medidas indica que a influência dos elementos verticais propaga-se ao longo do escoamento para o espaçamento escolhido neste estudo (cf. Sun & Shiono 2009). Verifica-se que para esta altura relativa a zona de maior velocidade encontra-se na posição central do canal principal na superfície livre. Por sua vez o escoamento no leito de cheia decorre a uma velocidade muito reduzida e aparentemente homogénea. Este padrão da velocidade pode decorrer da própria geometria do canal, uma vez que o leito de cheia apresenta uma largura suficiente para que as velocidades se equilibrem. É notória a inflexão acentuada das isolinhas da interface junto à superfície, que resulta da estrutura turbulenta em torno das árvores (semelhante à de um escoamento em torno de um obstáculo).

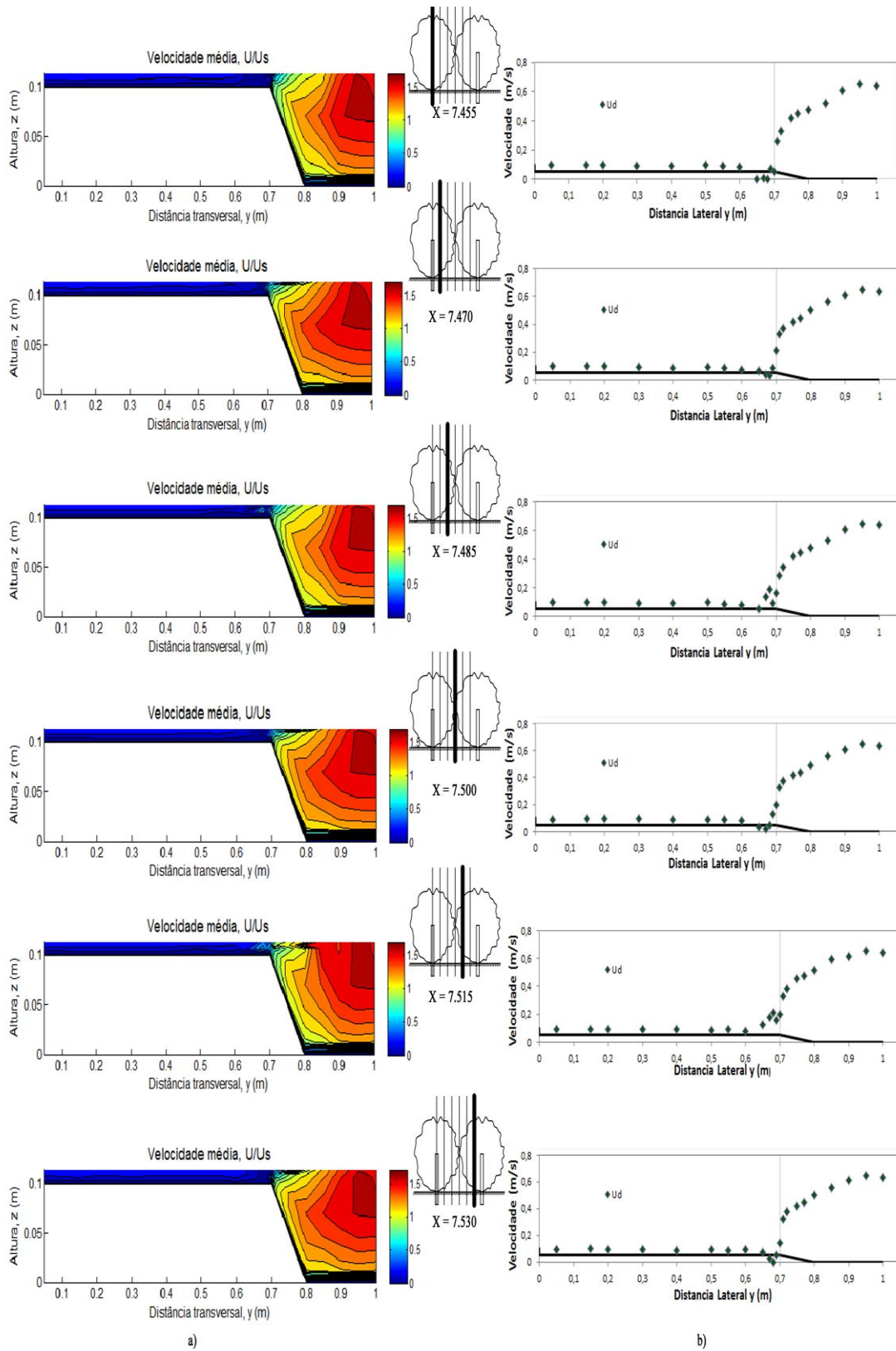


Figura 5.2: Distribuição das velocidades para hr015 com árvores, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade

A medição de seis secções consecutivas entre dois elementos verticais permitiu a apresentação da distribuição em planta da velocidade em concordância com a malha de medição apresentada na Figura 3.11. Para uma melhor visualização em planta, replicou-se os resultados das seis secções entre dois elementos consecutivos aos intervalos imediatamente a montante e a jusante.

A Figura 5.3 mostra a distribuição em planta da velocidade longitudinal média em profundidade. As árvores estão representadas por circunferências pretas, o sentido do escoamento dá-se de cima para baixo. Tal como na figura anterior também é visível o decréscimo da velocidade na proximidade dos elementos verticais assim como também é visível um decréscimo de velocidade no início do leito principal que decorre da presença das árvores na interface.

No intervalo $0,7\text{ m} \leq y \leq 0,9\text{ m}$ correspondente à interface, visualiza-se um claro padrão da velocidade média em profundidade. Regista-se um decréscimo da velocidade no final da copa das árvores seguido de um aumento ao longo do desenvolvimento longitudinal da copa seguinte. Este padrão é cíclico e remete para o desenvolvimento dos vórtices de eixo vertical que se desenvolvem horizontalmente.

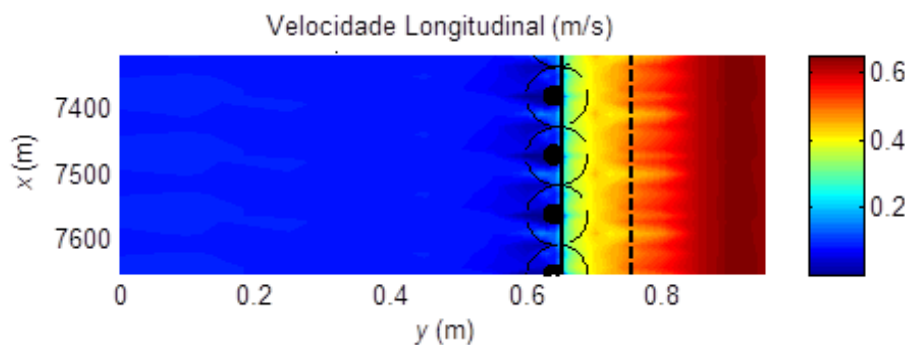


Figura 5.3: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr015

A Figura 5.5 apresenta as distribuições das velocidades para a altura relativa de escoamento de *hr020* (Figura 5.4). Analisando a interacção da altura de escoamento no leito de cheia e a geometria da copa das árvores depreende-se que a geometria dos elementos verticais vai influenciar a estrutura do escoamento. A altura de água do leito de cheia faz com que a copa das árvores fique parcialmente submersa, contrariamente ao que acontece em *hr015*. Por este motivo justifica-se, para *hr020* e *hr030*, a realização de ensaios com elemento verticais sem folhagem, os resultados são apresentados no subcapítulo 5.3.

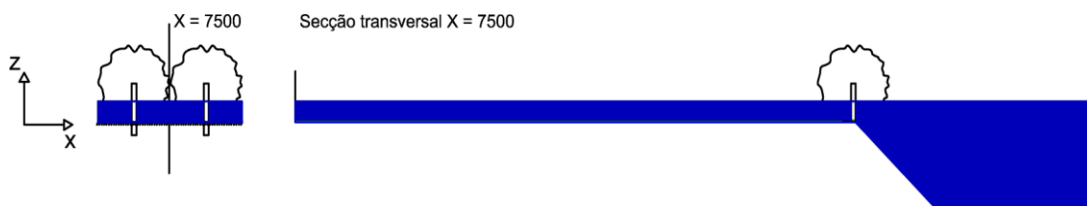


Figura 5.4: Altura do escoamento em hr020

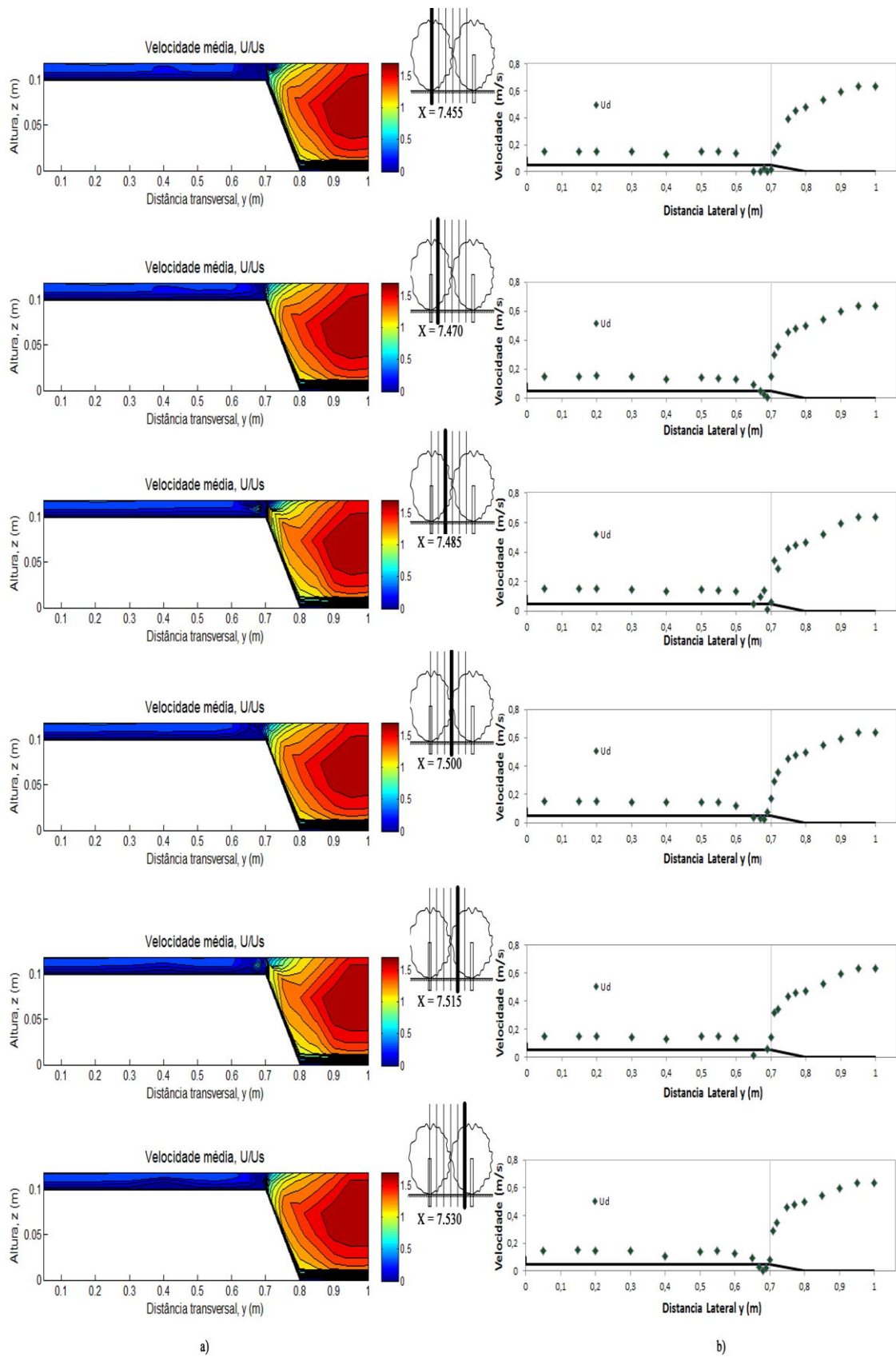


Figura 5.5: Distribuição das velocidades para hr020 com árvores, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade

Embora se verifique um ligeiro aumento de velocidade global, o padrão da velocidade média em profundidade na secção é semelhante ao verificado para a altura relativa de 0,15. Mantendo-se o nivelamento das velocidades no leito de cheia, o vértice de valores próximos de zero na zona das árvores e o aumento progressivo da velocidade no leito principal até o seu valor máximo verificado no centro da secção, em todas as secções transversais.

O aumento da velocidade global do escoamento, fruto do aumento da altura relativa também é visível na distribuição média no tempo. No leito principal a zona de maior velocidade deixa de se verificar na proximidade da superfície e vai se aproximando do fundo do canal.

A deformação das isolinhas perto da superfície em direcção ao leito principal tem maior intensidade do que as verificadas na Figura 5.2.

O deslocamento da zona de maior velocidade em direcção ao fundo do canal, assim como o deslocamento das menores velocidades à superfície para o interior do canal principal é resultado da estrutura turbulenta induzida pelas árvores.

A distribuição em planta da velocidade média em profundidade é apresentada na Figura 5.6 e revela que contrariamente ao aumento de velocidade global nos leitos, a velocidade verificada na zona da interface, mais concretamente em $0,7\text{ m} \leq y \leq 0,75\text{ m}$, é próxima de zero. O que se traduz num aumento do gradiente de velocidade entre os dois leitos e a zona das árvores, comparativamente aos resultados obtidos para hr015.

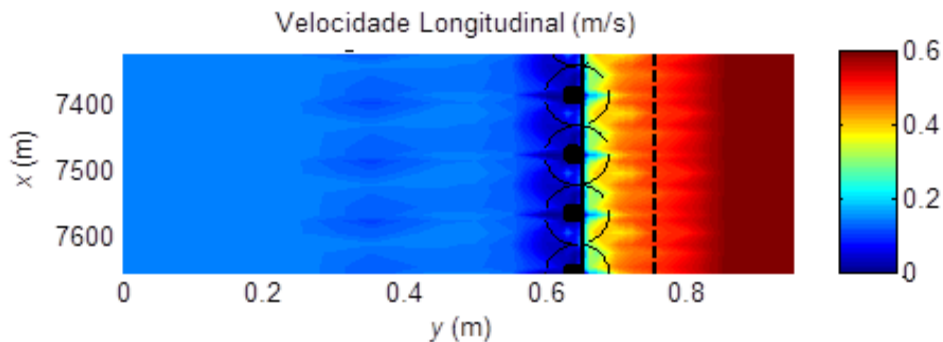


Figura 5.6: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr020

Para a altura de escoamento *hr030* e como seria de esperar a interacção entre a altura de escoamento do leito de cheia e a geometria das árvores é preponderante nos resultados da distribuição das velocidades (Figura 5.7).

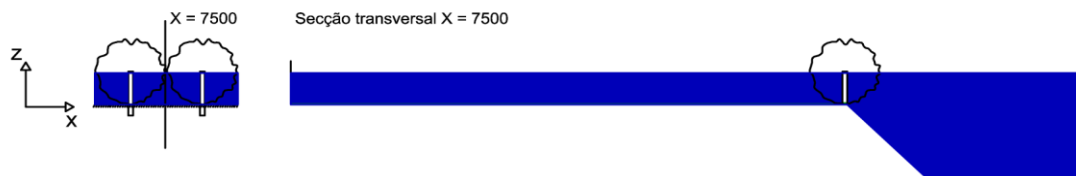


Figura 5.7: Altura do escoamento em *hr030*

O aumento da altura relativa faz com que as velocidades globais registadas na secção transversal sejam maiores, com efeito mais visível no leito de cheia. Apesar deste aumento global de velocidade, na zona das árvores a velocidade é praticamente nula. Esta diminuição de velocidade à medida que altura relativa aumenta, agrava o gradiente de velocidade que se gera entre as subsecções e a zona onde se encontra a vegetação. Este efeito é comprovado pelo ponto de inflexão registado na distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade e pela mudança de cor repentina entre a zona onde se localizam árvores e as duas subsecções que a circunscrevem (cf. Figura 5.8a e Figura 5.9).

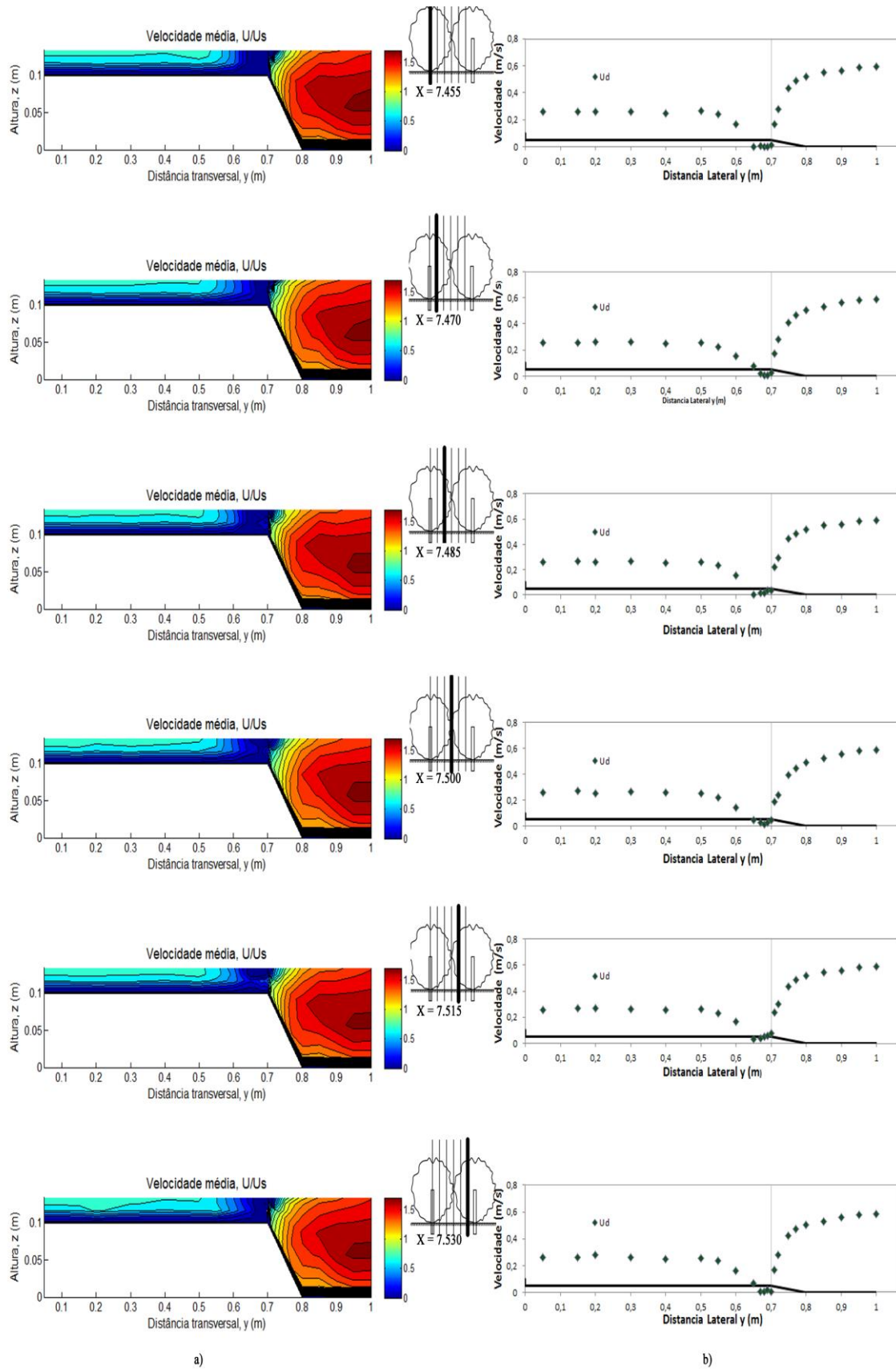


Figura 5.8: Distribuição das velocidades para hr030 com árvores, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade

À medida que se aumenta a altura relativa é notório que a zona de velocidades máximas no leito principal tende a deslocar-se para o fundo do canal. Este efeito é resultado da estrutura turbulenta de larga escala induzida pela presença de vegetação.

Uma vez que com o aumento da altura relativa, a velocidade na zona das árvores diminui aumentando nas subsecções fora da zona da junção, e as correntes secundárias induzidas pela vegetação aumentam no leito principal, podendo-se inferir que a sua influência na estrutura de escoamento é maior.

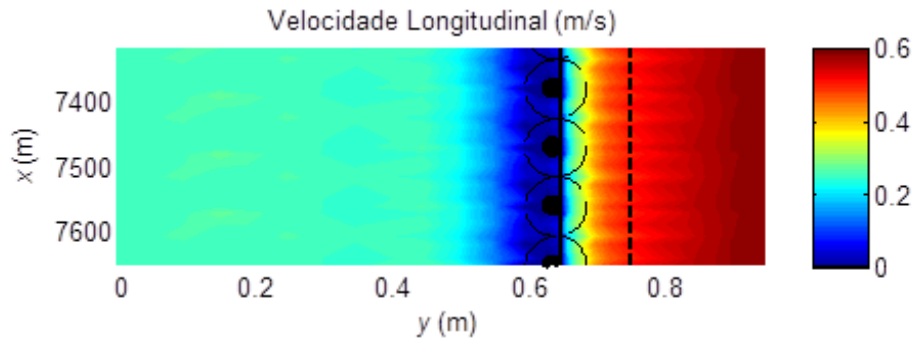


Figura 5.9: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr030

Tensões de Reynolds

No presente capítulo é apresentada a distribuição lateral das tensões de Reynolds $\tau_{xy} = -\rho \overline{u'v'}$ para as alturas relativas de 0,15, 0,20 e 0,30, assim como a distribuição transversal das tensões τ_{xy} médias em profundidade.

Na Figura 5.10 estão representadas as tensões de Reynolds τ_{xy} e a sua distribuição média em profundidade ao longo da secção transversal. Em canais de secção composta sem elementos verticais na interface, a presença de tensões geradas pela flutuação da componente da velocidade na direcção y é uma evidência da existência de transferência de quantidade de movimento lateralmente.

Pode-se verificar pela análise da figura que na zona da interface, coincidente com a localização das árvores, há uma transição de valores positivos para valores negativos. Isto pressupõe que obrigatoriamente em algum ponto dessa zona de transição o valor da tensão de Reynolds seja nulo, resultando num obstáculo à transferência de quantidade de movimento entre os leitos promovida pelo gradiente entre leito de cheia e leito principal (cf. Sanjou & Nezu 2011).

As tensões geradas na interface resultam do gradiente de velocidade existente entre as duas subsecções e a zona de velocidade reduzida onde se localizam as árvores. O aumento da zona de tensões na interface que se regista entre as secções transversais consecutivas: $X = 7,470$, $X = 7,485$ e $X = 7,500$, $X = 7,515$ torna evidente esta relação.

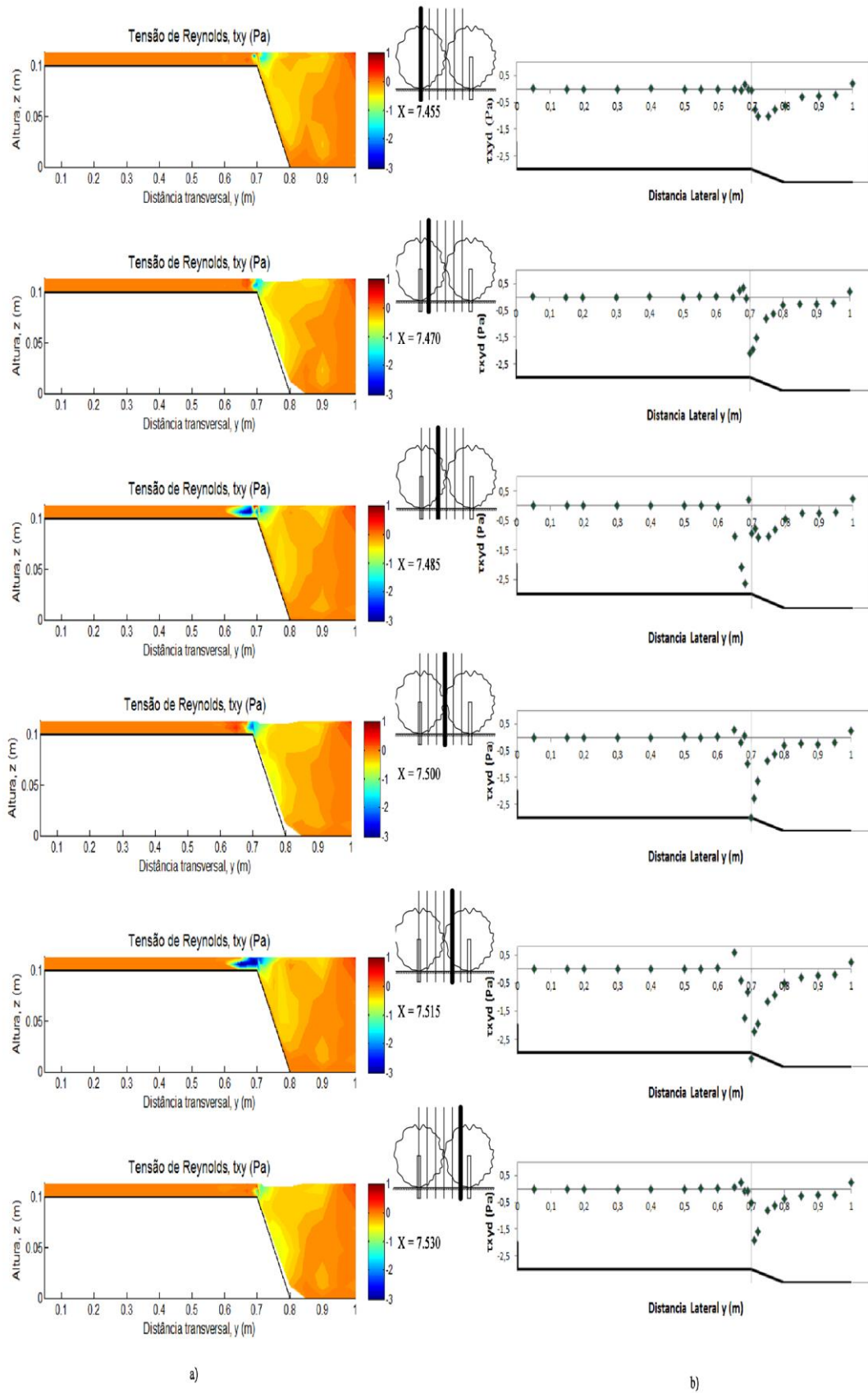


Figura 5.10: Distribuição das tensões de Reynolds para hr015 com árvores; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade

Assim como efectuado para a distribuição das velocidades, a Figura 5.11 apresenta a distribuição em planta das tensões de Reynolds médias em profundidade τ_{xy} para a altura relativa de 0,15.

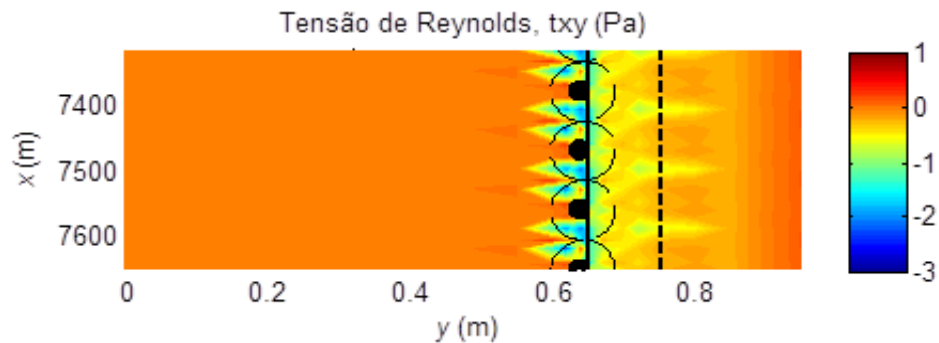


Figura 5.11: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr015

Tal como observado nas secções transversais é visível o aumento de tensão em valor absoluto na zona das árvores. Esta zona de maior tensão propaga-se ligeiramente para o leito principal, sendo que rapidamente se transforma numa tensão residual com valores próximos de zero. No leito de cheia não se verifica a propagação da tensão gerada na interface, registando em alguns pontos valores de tensão positivos. A distribuição em planta evidencia a mudança de sinal na zona da interface revelando o bloqueio que as árvores impõem à transferência de quantidade de movimento entre os dois leitos.

A distribuição lateral das tensões de Reynolds τ_{xy} para hr020 com árvores como elementos verticais, assim como a sua representação em planta são apresentadas na Figura 5.12 e Figura 5.13.

Os resultados da distribuição da tensão de Reynolds nas seis secções transversais mostram a relação da influência do aumento da altura relativa com presença dos elementos verticais. Assim como foi verificado em hr015 existe a formação de uma zona de tensões entre $0,65 \text{ m} \leq y \leq 0,75 \text{ m}$, à medida que se afastam deste intervalo as tensões aproxima-se de zero.

Com o aumento da altura relativa a diferença entre o gradiente de velocidades do leito principal e do leito de cheia diminui, pelo que seria de esperar uma diminuição da zona de tensões geradas na interface. Através da comparação com os resultados obtidos em hr015 podemos constatar que as tensões que se geram na interface aumentam em vez de diminuírem. Este aumento é devido a presença de árvores nessa zona. Como verificado nas Figura 5.5, e Figura 5.6 a velocidade na zona da interface, e particularmente na zona onde a folhagem das árvores se encontra submergidas é muito próxima de zero. Este facto faz com que o gradiente de velocidade entre a zona da vegetação e cada uma das subsecções do canal seja ainda maior.

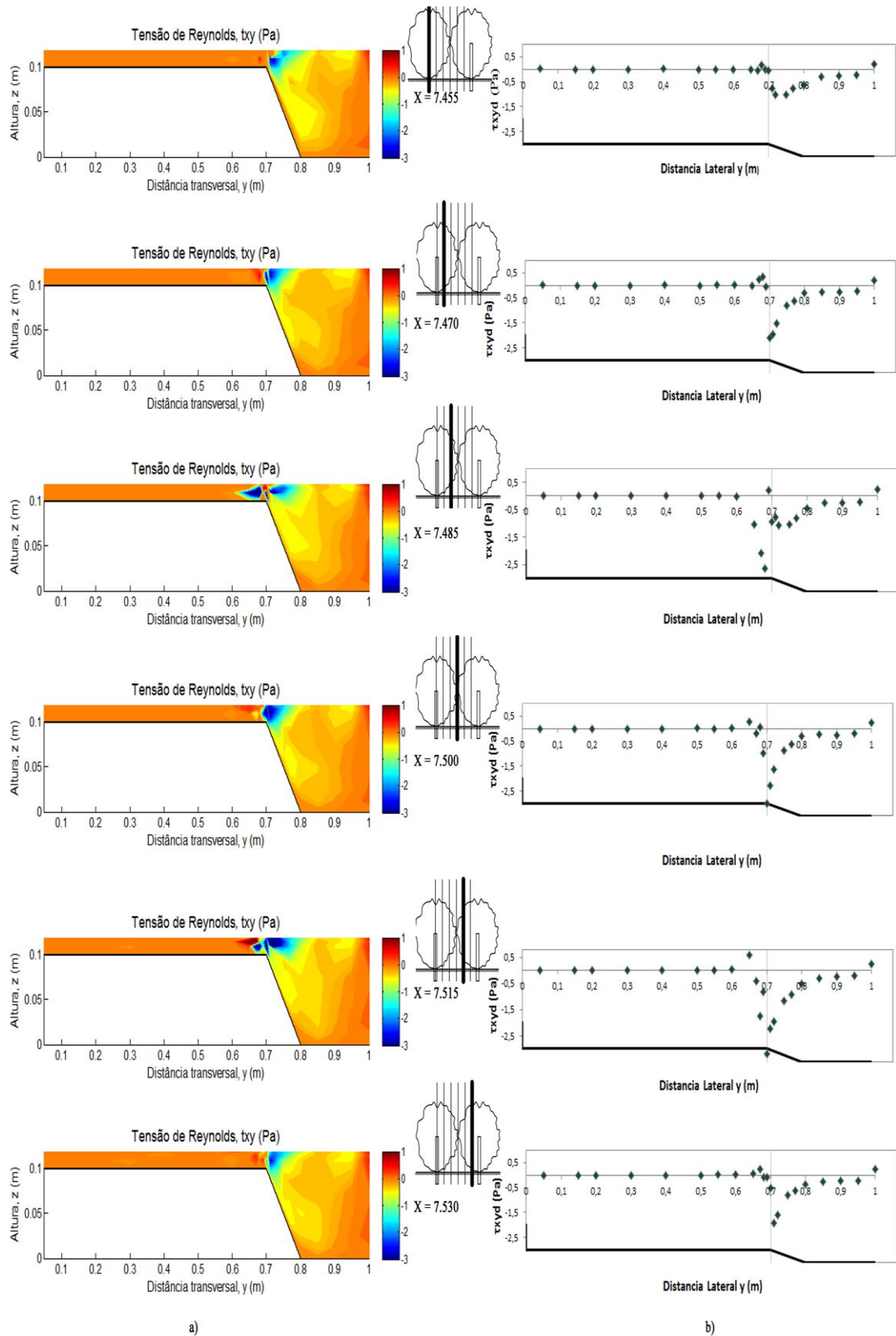


Figura 5.12: Distribuição das tensões de Reynolds para hr020 com árvores; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xyd} transversal média em profundidade

A distribuição plana das tensões laterais médias em profundidade evidencia a forte influência que as árvores têm no escoamento (Figura 5.13). O aumento da tensão comparativamente com os valores registados em hr015 indica que o efeito provocado pela vegetação se sobrepõe ao efeito provocado pelo aumento de altura relativa.

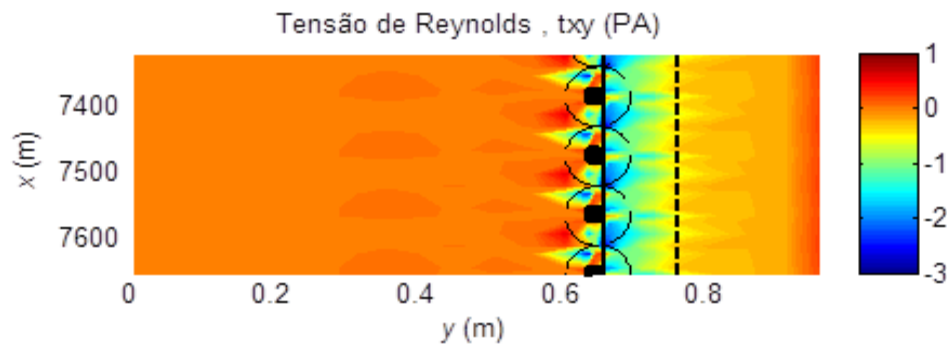


Figura 5.13: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr020

A distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} para a configuração em que os elementos verticais são árvores para a altura relativa de hr03 está representada nas figuras Figura 5.14 e Figura 5.15.

Através da análise da figura conclui-se que com o aumento da altura relativa, as tensões geradas pela flutuação da componente da velocidade na direcção y aumentam, isto deve-se, como foi verificado anteriormente ao aumento do gradiente de velocidade entre as subsecções e a zona da vegetação.

As zonas de tensões negativas e positivas no leito principal e leito de cheia, são mais evidentes, o seu valor médio em profundidade é maior em valor absoluto. Para esta altura relativa regista-se o aparecimento de tensões importantes na subsecção do leito de cheia, fruto duma maior altura de escoamento as estruturas turbulentas passam a poder desenvolver-se também neste leito, obviamente com sinal contrário à das correspondentes no leito principal pois o gradiente de velocidades é inverso.

O padrão da evolução da zona de tensões entre secções transversais consecutivas na interface não é semelhante ao verificado para hr015 e hr020. Na passagem da primeira para a segunda assim como da terceira para a quarta há um aumento da zona das tensões, diminuindo da segunda para a terceira. A evolução da região de tensões da quarta secção para a quinta tem um comportamento particular, aumentando ligeiramente no leito principal e diminuindo no leito de cheia.

A propagação das tensões τ_{xy} no leito principal também aumenta com a altura relativa tendo como direcção preponderante a superfície do escoamento, à semelhança do que acontece para outras alturas relativas analisadas.

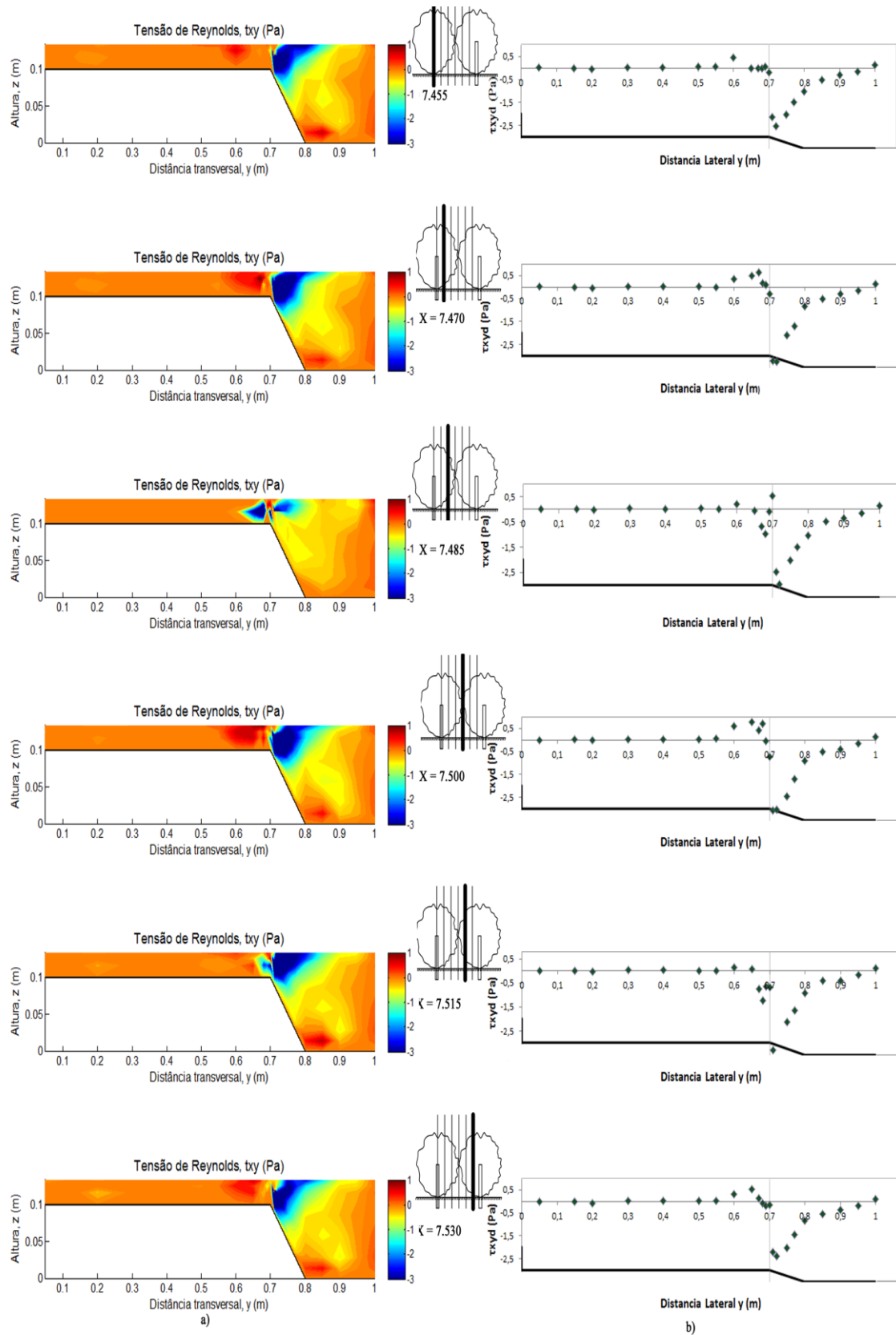


Figura 5.14: Distribuição das tensões de Reynolds para hr030 com árvores; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade

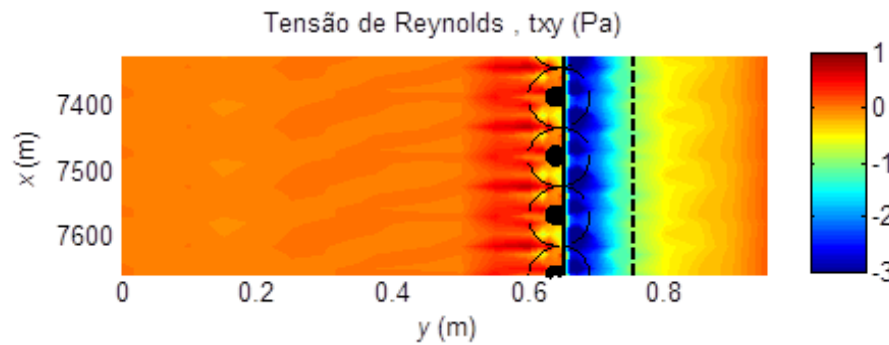


Figura 5.15: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr030

5.3. Caracterização do escoamento em canais de secção composta com elementos verticais na interface - troncos

No presente subcapítulo são apresentados os resultados das distribuições da velocidade longitudinal e das tensões de Reynolds τ_{xy} obtidos para hr020 e hr030. Os resultados apresentados respeitam a malha da Figura 3.10 e 3.11. As medições foram conduzidas com troncos na junção, dispostos como mostrado na Figura 4.1 b). Face às razões evidenciadas em 5.2, não foram realizadas medições com troncos na junção dos leitos para uma altura relativa de 0,15. De notar que nas secções $X = 7.455$ e $X = 7.470$ os pontos da malha na posição $Y = 0,68$ não foram possíveis de medir como foi elucidado no subcapítulo 3.3.

Distribuição das velocidades

A distribuição das velocidades é apresentada na Figura 5.16. Podemos observar os resultados da velocidade longitudinal média no tempo, e da velocidade média em profundidade obtidos para hr020.

Analisando as seis secções, verifica-se que a velocidade no leito de cheia é muito inferior à velocidade registada no leito principal. Passando bruscamente de valores na ordem dos 0,2 m/s, equilibrados ao longo do desenvolvimento transversal do leito de cheia, para valores na ordem dos 0,6 m/s.

A presença de correntes secundárias é visível nos resultados da velocidade média no tempo, através das protuberâncias das isolinhas do leito principal na direcção do leito de cheia.

A zona da velocidade máxima dá-se no leito principal na proximidade da superfície e é claro o nivelamento da mesma no leito de cheia, fruto dum escoamento aparentemente homogéneo nessa subsecção. O facto dos resultados serem bastante similares nas seis secções medidas mostra que para o espaçamento escolhido $\frac{e}{d} = 19$ a influência dos troncos se mantém constante ao longo do canal, uma vez atingido o escoamento uniforme.

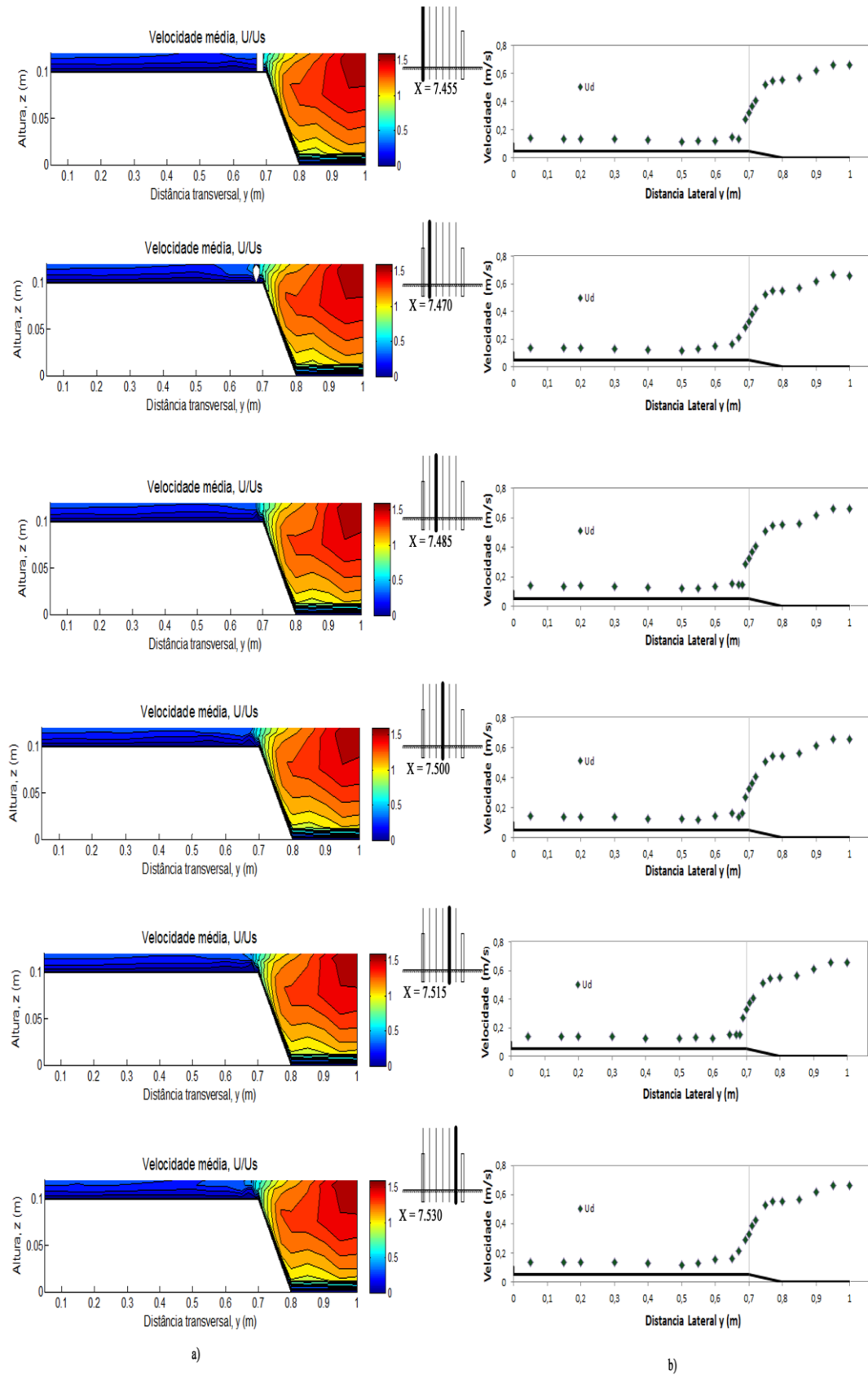


Figura 5.16: Distribuição das velocidades para hr020 com troncos, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade

Na Figura 5.17 são apresentados os resultados da distribuição média da velocidade longitudinal em profundidade. Os círculos pretos representam a disposição dos troncos ao longo da junção.

Esta representação mostra claramente que o escoamento no canal de secção composta tem velocidades diferentes em cada subsecção. O acréscimo da velocidade longitudinal é marcado pela mudança de cor e ocorre ainda no leito de cheia, aumentando repentinamente à medida que se aproxima do seu valor máximo registado no centro da secção transversal.

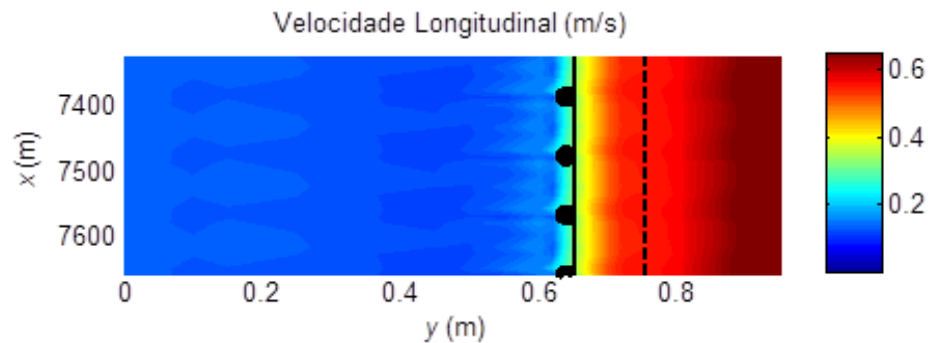


Figura 5.17: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr020

Os resultados da distribuição longitudinal da velocidade com troncos dispostos na interface dos leitos, para a altura relativa de 0,30 são apresentados nas figuras Figura 5.18 e Figura 5.19. Analogamente ao sucedido nas medições realizadas em hr020, não foi possível medir nas secções $X = 7,455$ e $X = 7,470$ os pontos da malha na posição $Y = 0,68$.

Verifica-se que com o aumento de altura relativa a velocidade longitudinal global de escoamento também aumenta. Não obstante deste facto, as velocidades longitudinais registadas na zona onde se encontram os elementos verticais não segue a tendência da restante secção transversal.

É visível nas secções $X = 7,485$, $X = 7,500$ e $X = 7,515$ da Figura 5.18b, a formação de um vértice no desenvolvimento de U_d , característico da presença de elementos verticais na interface. Indicando que nessa posição a velocidade de escoamento é atrasada pelos elementos verticais.

Esta diminuição na zona dos troncos também se constata nos resultados obtidos para hr020, embora seja perceptível que com o aumento da altura relativa a variação de velocidade entre as subsecções do escoamento e a zona da vegetação é mais relevante. No caso dos troncos esta variação ocorre ainda no limite do leito de cheia.

A zona onde se registam as velocidades máximas no leito principal é mais extensa do que a verificada na Figura 5.16. Com o aumento de altura relativa esta zona de velocidades máximas tem tendência para se deslocar para o fundo do canal. Este fenómeno é devido à influência que a linha de troncos dispostos no limite do leito de cheia tem no escoamento.

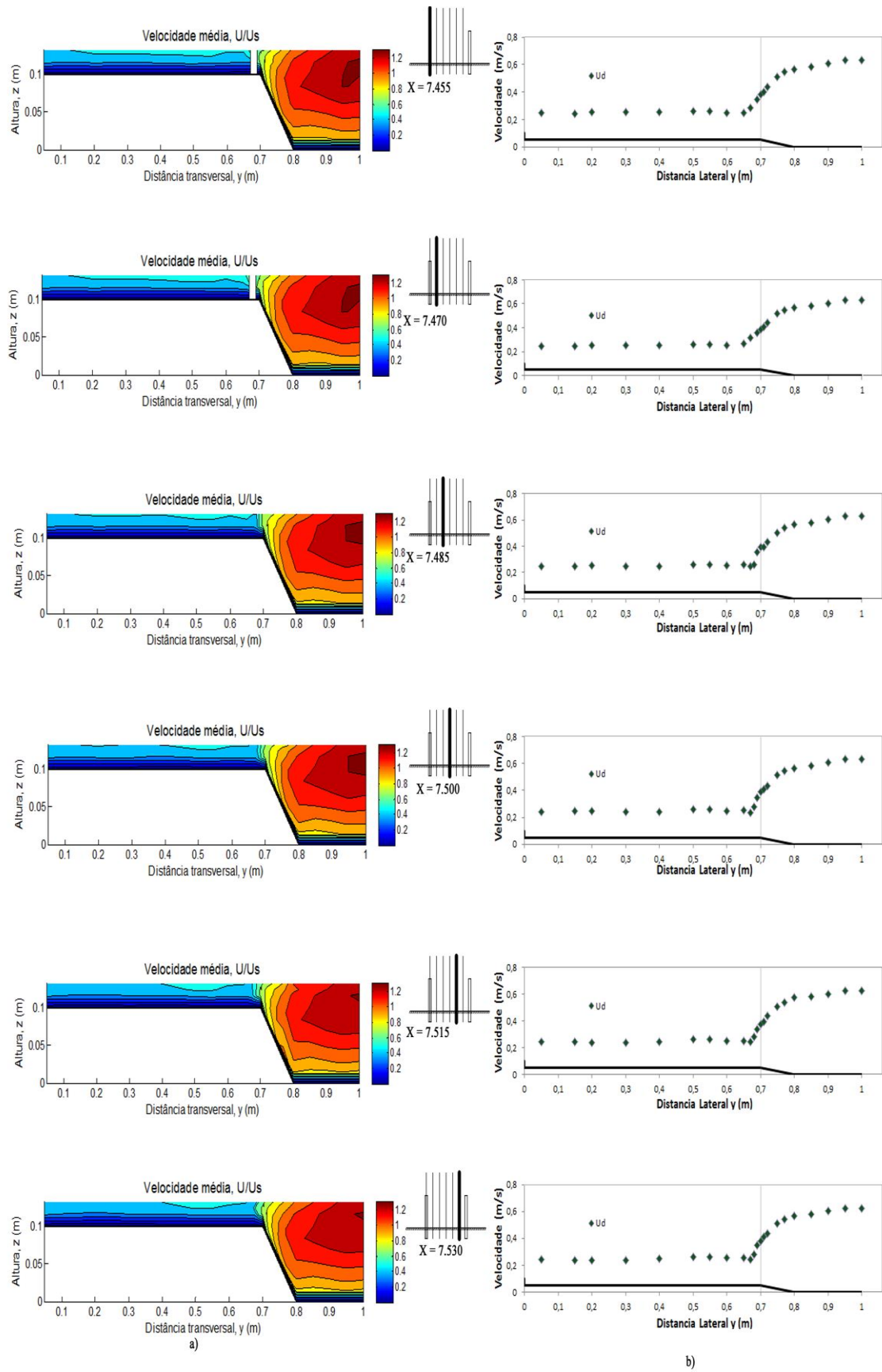


Figura 5.18: Distribuição das velocidades para hr030 com troncos, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade

A Figura 5.19 apresenta a distribuição em planta das velocidades médias em profundidade. O aumento de velocidade longitudinal em relação as medições conduzidas para hr020 é visível tanto no leito de cheia como no leito principal. Assim com na Figura 5.17 o gradiente de velocidade entre as subsecções e o desenvolvimento longitudinal da linha de troncos é perfeitamente claro.

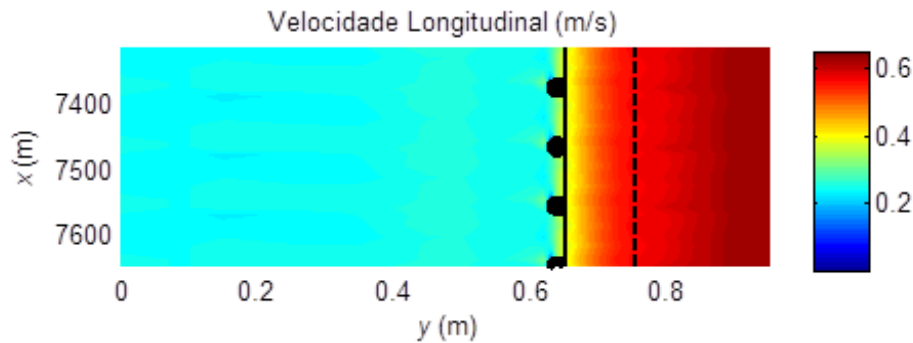


Figura 5.19: Distribuição em plana da velocidade longitudinal média em profundidade para hr030

Tensões de Reynolds

No presente capítulo é apresentada a distribuição lateral das tensões de Reynolds $\tau_{xy} = -\rho \overline{u'v'}$ para as alturas relativas de 0,20 e 0,30 assim como a distribuição transversal das tensões τ_{xy} médias em profundidade.

A distribuição das tensões de Reynolds para a hr020 com troncos como elementos verticais é apresentada nas Figura 5.20 e Figura 5.21. Assim como para os valores de velocidade não foi possível medir os pontos da malha da posição $Y = 0,68$ nas secções $X = 7,455$ e $X = 7,470$.

Para a configuração testada, a região de tensões geradas pela flutuação da componente da velocidade na direcção y tem maior intensidade no limite do leito de cheia, estendendo-se verticalmente em direcção ao fundo. As tensões registadas na zona da junção dissipam-se no resto da secção transversal apresentado valores próximos de zero.

O local onde se registam tensões com maior intensidade coincide com a posição dos elementos verticais no leito de cheia. Podemos verificar na distribuição transversal média em profundidade que nas secções mais próximas do elemento vertical ($X = 7,455$, $X = 7,470$ e $X = 7,485$) há uma oscilação de sinal entre dois pontos consecutivos. Esta oscilação de sinais implica que entre esses dois pontos a τ_{xy} haja um valor nulo. Pelo que, a presença de troncos alinhados longitudinalmente com o espaçamento escolhido, também constitui um obstáculo à transferência de quantidade de movimento entre os dois leitos.

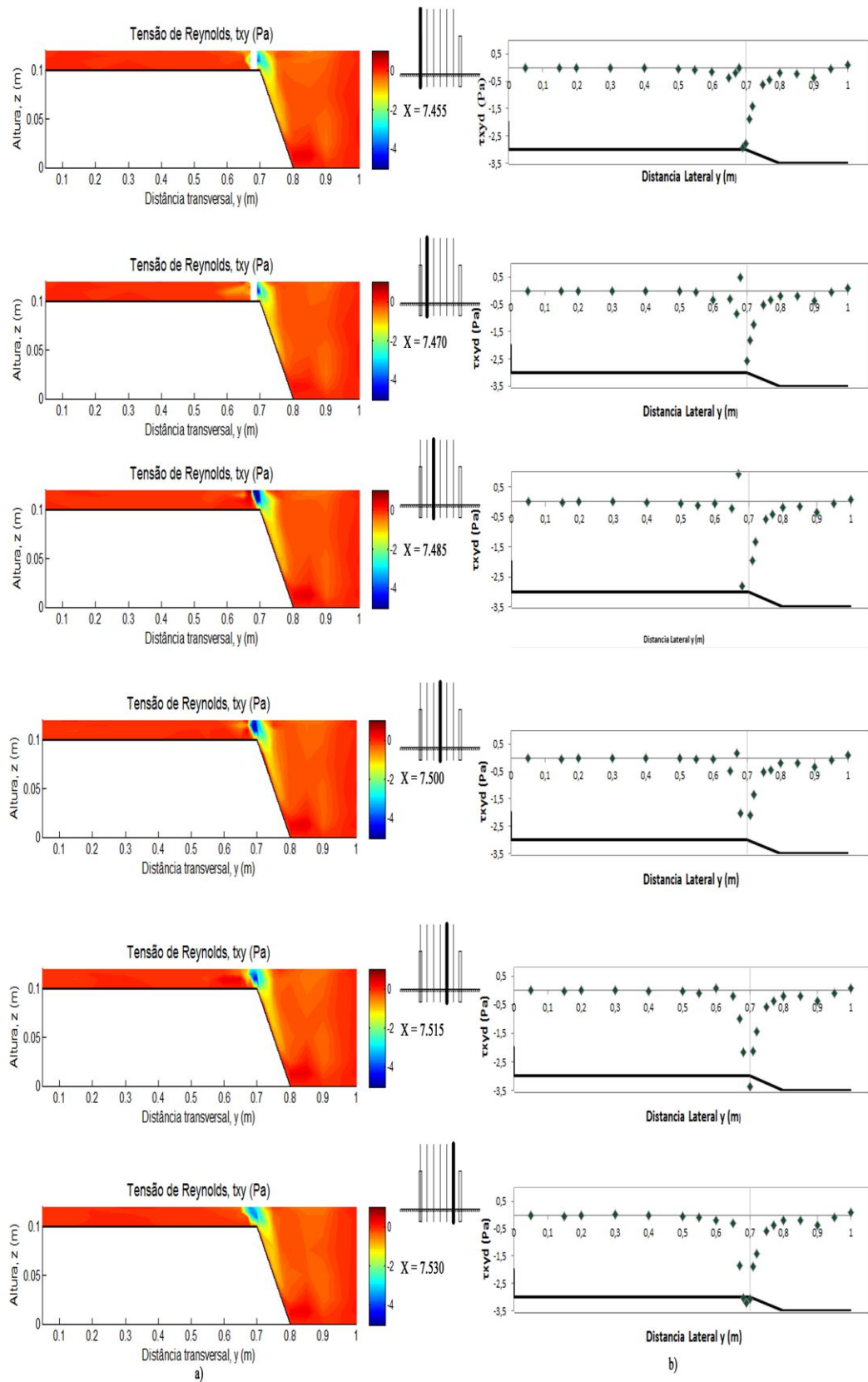


Figura 5.20: Distribuição das tensões de Reynolds para hr020 com troncos; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade

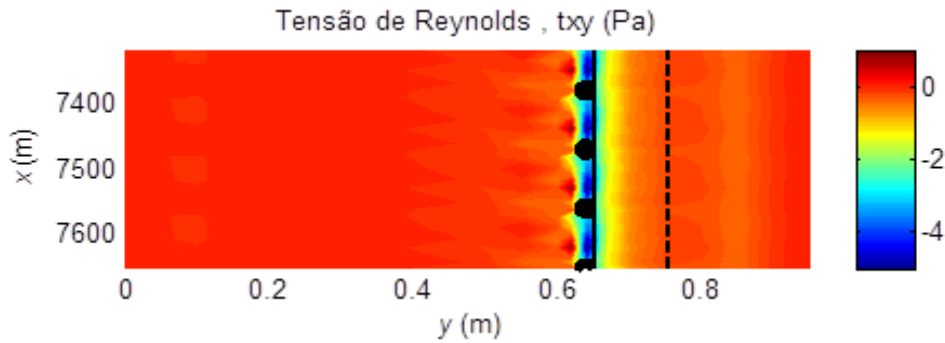
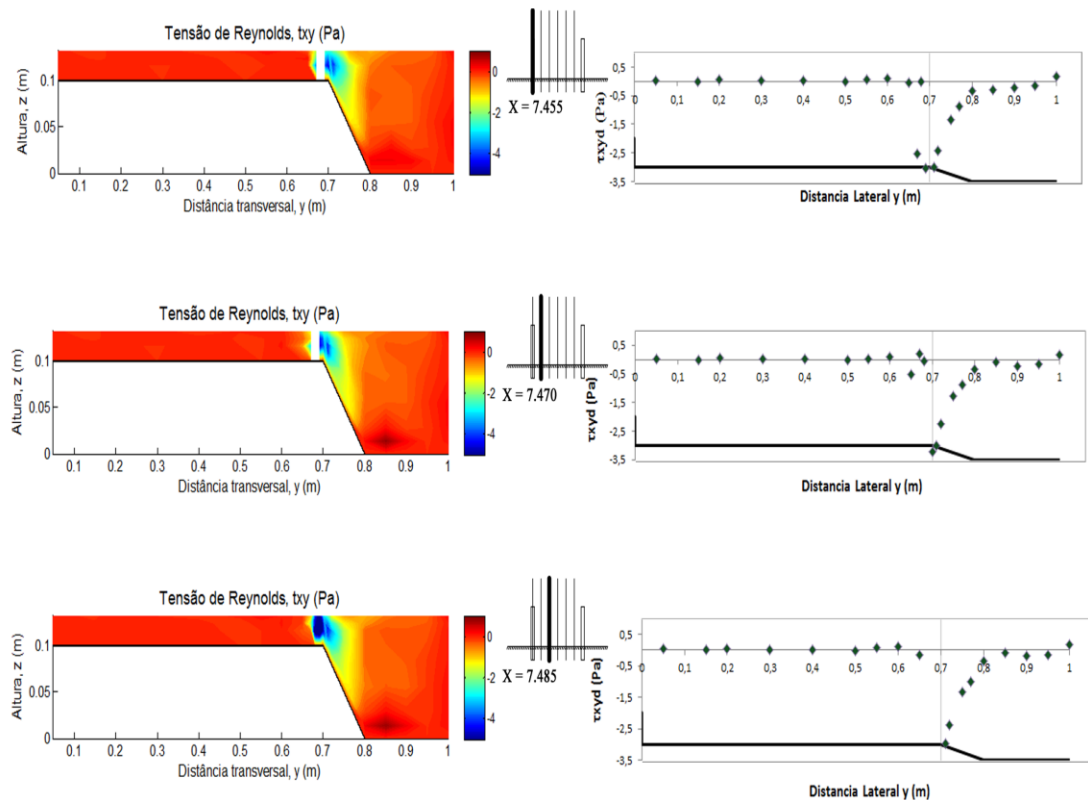


Figura 5.21: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr020

A distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} para a configuração em que os elementos verticais são troncos para a altura relativa de hr03 esta representada nas Figura 5.22 e Figura 5.23.

Os resultados apresentados comprovam que à medida que se aumenta a altura relativa o valor de tensão lateral aumenta. Isto deve-se à formação de duas camadas de mistura, uma no leito principal e outra no leito de cheia. Ambas são causadas pela interacção da subsecção com o escoamento que decorre a uma velocidade mais baixa devido à interferência causada pelos troncos.

Este facto é indicado pela região negativa de tensão na zona dos troncos representada pela cama azul, e pela região de valores de tensão positivos prévios ao tronco no leito de cheia (cf. Figura 5.22a).



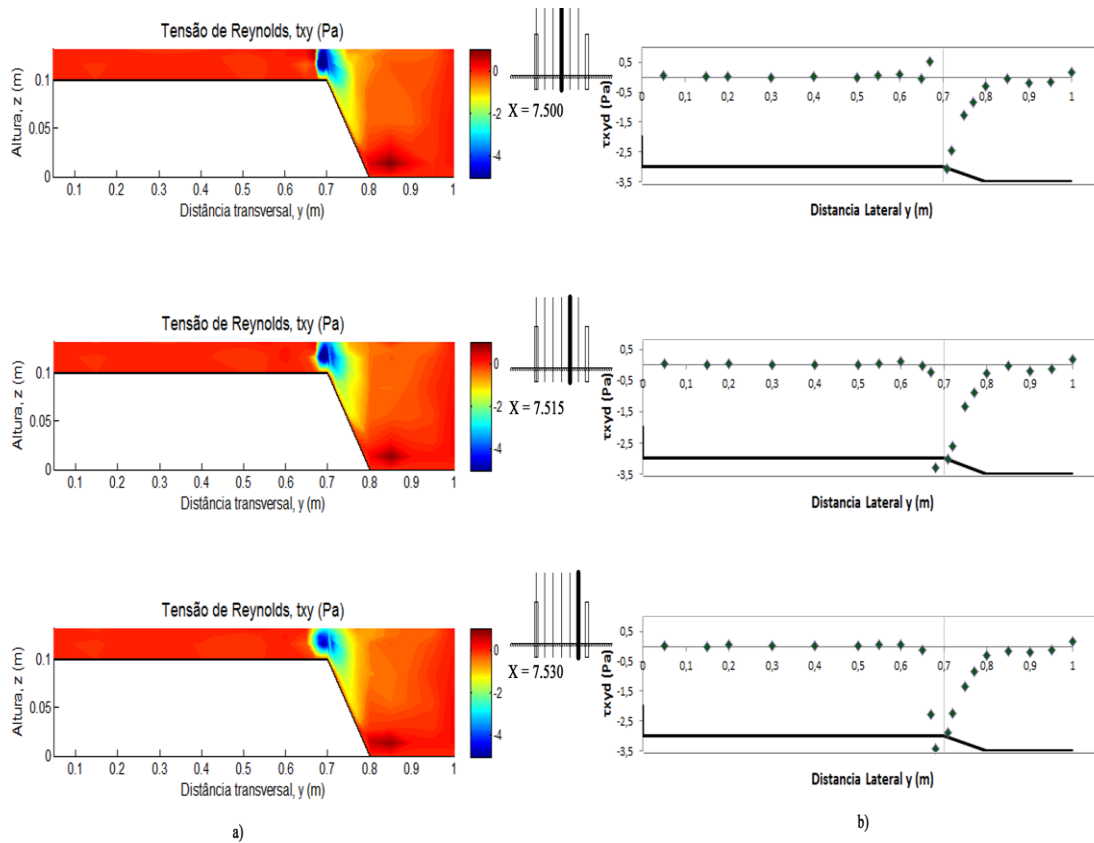


Figura 5.22: Distribuição das tensões de Reynolds para hr030 com troncos; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade

A Figura 5.23 apresenta a distribuição plana de τ_{xy} média em profundidade. Tendo em conta os resultados obtidos para hr020, é evidente que o aumento em valor absoluto das camadas de tensão positivas e negativas não são induzidas pelo facto de se aumentar a altura relativa, mas sim consequência da presença de vegetação na interface.

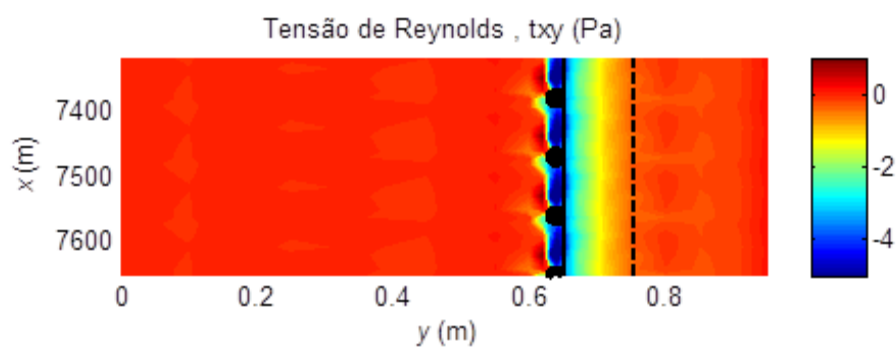


Figura 5.23: Distribuição em planta da tensão de Reynolds média em profundidade para hr030

5.4. Influência do tipo de elemento vertical e da altura relativa

O presente subcapítulo analisa o efeito da altura relativa e da tipologia dos elementos verticais no escoamento, comparando os resultados obtidos das distribuições da velocidade longitudinal e das tensões de Reynolds τ_{xy} para *hr020* e *hr030*, das duas configurações testadas (cf. Figura 4.1 a) e b)). A comparação dos resultados tem como secção de referência a secção central entre dois elementos verticais consecutivos ($X = 7.500$ m).

Distribuição das velocidades

A Figura 5.24 diz respeito à comparação dos resultados das velocidades obtidos nas duas configurações para *hr020* tendo como secção de referencia a secção central entre elementos consecutivos ($X = 7.500$ m).

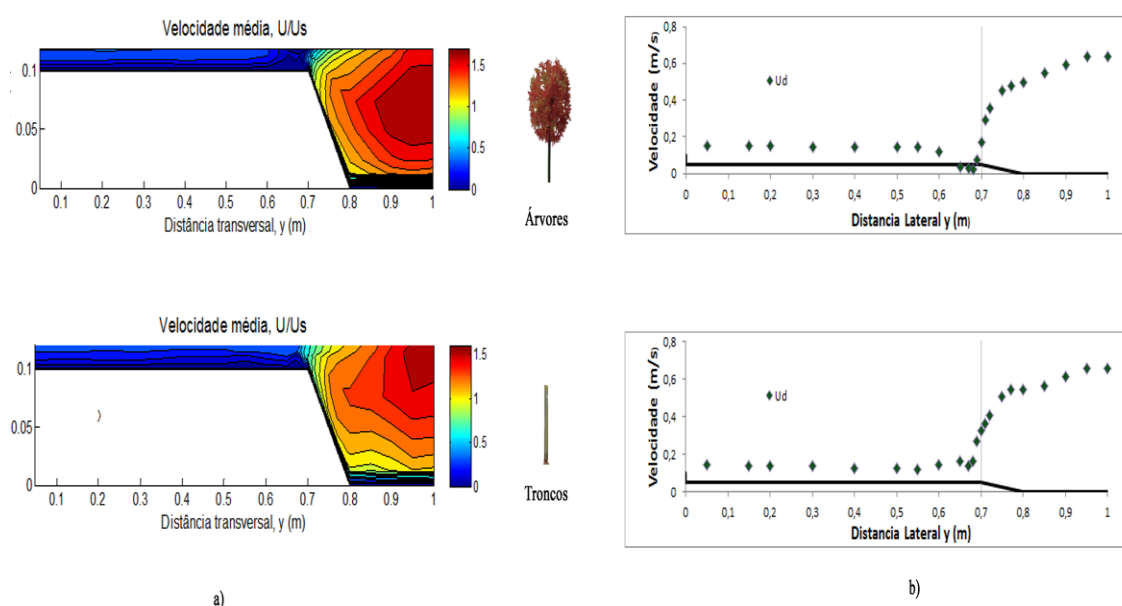


Figura 5.24: Comparação entre os resultados da distribuição das velocidades longitudinais obtidos com diferentes elementos verticais para *hr020*, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade

A velocidade longitudinal média em profundidade tem um desenvolvimento transversal semelhante nas duas configurações, diferenciando-se ligeiramente na junção dos dois leitos. Verifica-se que na presença de árvores a redução da velocidade média em profundidade nas coordenadas $0,67\text{ m} \leq y \leq 0,7\text{ m}$ aproxima-se de zero, ao passo que na situação dos troncos a redução de velocidade não é acentuada, indicando que a influência das árvores na estrutura de escoamento é maior que a registada para o caso dos troncos.

Verifica-se que a zona de velocidades máximas no leito principal é maior quando os elementos verticais são árvores, e no caso dos troncos esta zona localiza-se no centro do canal na proximidade da superfície livre.

A maior velocidade global do escoamento no leito principal, a propagação das baixas velocidades para a superfície do leito principal e a concavidade das isolinhas, bem marcada na direcção da superfície, dos resultados obtidos com árvores, confirmam que em relação aos troncos a sua influência no escoamento é mais marcada, pela influência da copa das árvores.

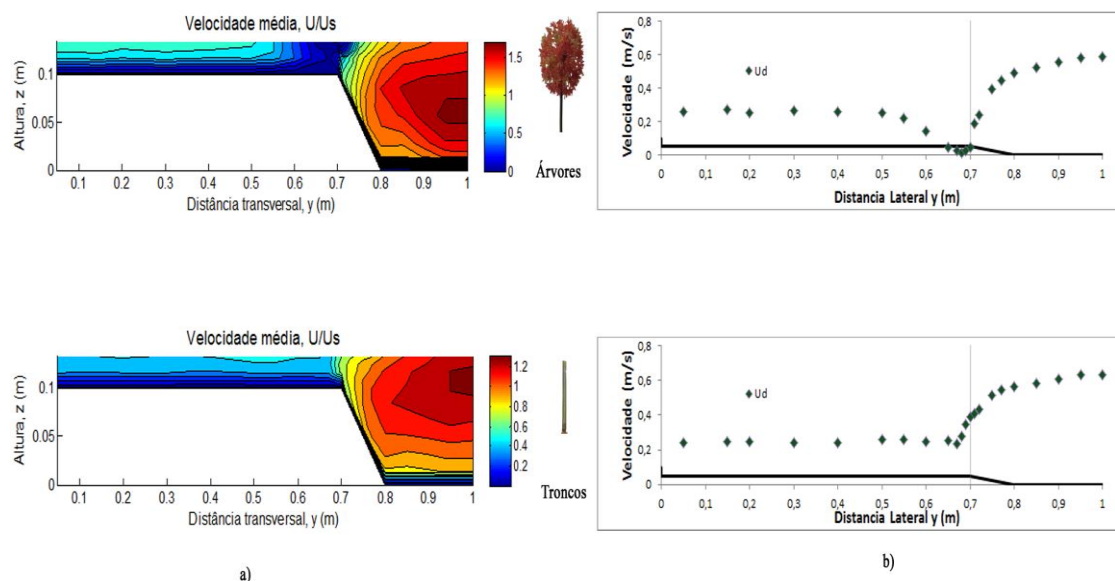


Figura 5.25: Comparação entre os resultados da distribuição das velocidades longitudinais obtidos com diferentes elementos verticais para hr030, a) distribuição da velocidade U/U_s média no tempo e b) distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade

A Figura 5.25 apresenta a comparação entre os resultados da distribuição das velocidades longitudinais obtidos com diferentes elementos verticais para hr030. O perfil da distribuição longitudinal média em profundidade é semelhante para as duas configurações. Registrando-se em ambas a diminuição de velocidade na zona dos elementos verticais. Embora se constate que são semelhantes, é evidente que a redução da velocidade no caso das árvores é bastante mais significativa, o que já sucedia para hr020. No caso das árvores o aumento de altura relativa torna perfeitamente visível, a formação dos gradientes de velocidade entre cada uma das subsecções.

Na configuração com árvores a zona de velocidades nula é muito mais preponderante e a propagação desses valores tanto no leito de cheia como no leito principal é mais explícita. Os gradientes que se geram em cada leito são maiores. Com o aumento da altura relativa, a zona onde ocorrem as velocidades máximas no leito de cheia desloca-se para o fundo nas duas configurações, sendo mais preponderante no caso das árvores

Tensões de Reynolds

No que diz respeito à distribuição lateral das tensões de Reynolds τ_{xy} , é visível que a diferença reside na forma, intensidade, e posição da região de tensões geradas na junção do leito principal com o leito de cheia.

No que diz respeito à intensidade a distribuição média em profundidade indica que em termos de valor absoluto as tensões geradas pelas árvores são mais elevadas (cf. Figura 5.26 b). A forma da região de tensões, no caso das árvores tem o seu foco na junção deslocando-se para a superfície. Contrariamente ao registado quando os elementos verticais são árvores, as regiões de tensões geradas deslocam-se para o fundo do canal. Em termos de posição ambas as regiões de tensões negativas estão localizadas na junção dos leitos. Sendo que no caso das árvores a região tem maior expressão no leito principal. No caso dos troncos o efeito mais preponderante dá-se no leito de cheia. Mais concretamente na posição ocupada pelos troncos (cf. Figura 5.26).

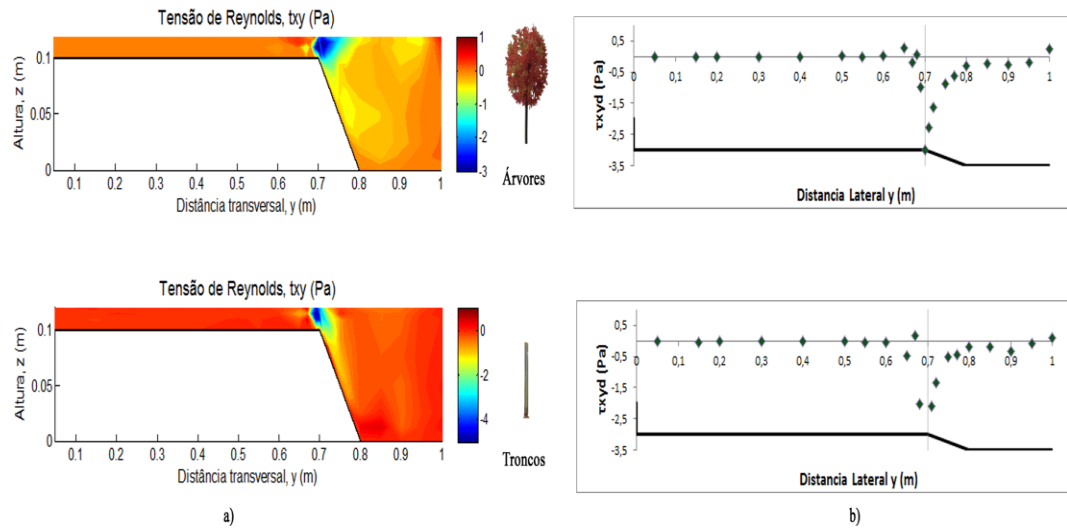


Figura 5.26: Comparação entre os resultados das tensões de Reynolds obtidos com diferentes elementos verticais para *hr020*; a) distribuição τ_{xy} média no tempo; b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade

No que diz respeito à distribuição de Reynolds τ_{xy} para *hr030*, a Figura 5.27 apresenta a comparação de resultados obtidos para configurações com árvores e com troncos.

A distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade é semelhante nos dois casos, passando de valores positivos no leito de cheia para valores negativos no início do leito de cheia, tornando-se tensões residuais à medida que se aproximam do centro do canal. Esta variação de sinal, como já foi referido anteriormente, é elucidativa do obstáculo que os elementos verticais impõem à transferência de quantidade de movimento entre os dois leitos. Este efeito de bloqueio é mais visível no caso das árvores. A camada de tensões negativas no caso dos troncos tem o seu núcleo no limite do leito de cheia, coincidindo com a posição dos troncos, e propagando-se na direcção do fundo do canal. No caso das árvores observa-se o deslocamento desse mesmo núcleo para o início do desenvolvimento transversal do leito principal, propagando-se para a superfície de escoamento.

Pelo que se demonstra que a distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} e a distribuição da velocidade longitudinal é fortemente influenciada pela presença de elementos verticais. Tendo maior influencia no escoamento quando os elementos verticais são dotados de folhagem e a altura relativa é maior.

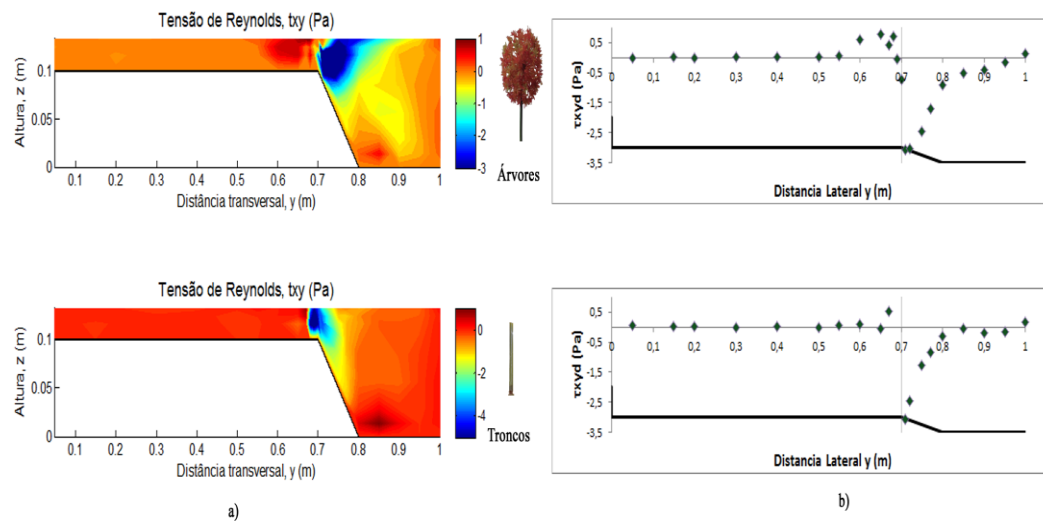


Figura 5.27: Comparação entre os resultados das tensões de Reynolds obtidos com diferentes elementos verticais para hr030, a) distribuição τ_{xy} média no tempo e b) distribuição de τ_{xy} transversal média em profundidade

6. Conclusões e propostas para futuros desenvolvimentos

6.1. Conclusões

O presente estudo aborda o escoamento em canais de secção composta com vegetação ripícola emergente. O trabalho apresentado nesta dissertação é um trabalho experimental. As experiências foram conduzidas nas instalações do LNEC, no canal de secção composta Veiga da Cunha, com 10 metros de comprimento e 2 metros de largura.

Procurou caracterizar-se o escoamento em torno de vegetação marginal aos leitos do canal de secção composta. Os efeitos da vegetação ripícola foram analisados experimentalmente em regime de escoamento uniforme considerando duas condições distintas: (i) leitos de cheia rugosos com árvores na interface, (ii) leitos de cheia rugosos com troncos na interface. Para tal efeito foram testadas três alturas relativas para a condição (i) hr015, hr020 e hr030, e duas para a condição (ii) hr020 e hr030.

As medições foram conduzidas em seis secções transversais, entre dois elementos verticais consecutivos a jusante da secção $X = 7.455$ m, por se considerar que tanto a camada limite como a camada de mistura já se encontra totalmente desenvolvida.

Os processos físicos que ocorrem num canal de secção composta com vegetação marginal disposta sobre uma linha longitudinal são complexos e têm um comportamento tridimensional. O presente estudo analisa experimentalmente os efeitos que a vegetação induz na velocidade longitudinal e nas tensões τ_{xy} . Devido a limitações do equipamento, mais concretamente a problemas relacionados pelo vectrino no plano xz . No qual a recepção do sinal emitido pelo equipamento estava comprometida pela posição emergente das suas hastes, comprometendo a qualidade dos valores de velocidade registados para a direcção z .

Os resultados obtidos para ambas as condições permitiram tirar as seguintes conclusões:

- Existe um claro gradiente de velocidade entre os leitos do canal e a zona onde se localizam os elementos verticais para as duas condições. Este gradiente de velocidade é responsável pela formação de regiões de tensões laterais τ_{xy} .
- Com o aumento de altura relativa a velocidade global de escoamento aumenta. Na interface, devido à presença de vegetação este efeito não é significativo, o gradiente de velocidade entre a interface e cada subsecção aumenta, por conseguinte aumentam as regiões das tensões laterais.
- Em todas as alturas relativas, o perfil da velocidade média em profundidade para as duas condições segue o mesmo padrão, registando-se velocidades baixas e niveladas no leito de cheia, diminuindo consideravelmente na posição onde se encontram os

elementos verticais, seguido de um aumento brusco à entrada do leito principal. A diminuição da velocidade no caso (ii) é mais evidente, aproximando-se de zero à medida que a altura relativa aumenta.

- A zona de velocidades reduzidas influencia o escoamento do leito de cheia em ambos os casos. Verificando-se no caso (ii) uma propagação do efeito da diminuição das velocidades para a superfície no início do leito principal.
- Ambos os casos seguem o mesmo padrão das distribuições de velocidade longitudinal, tendo como características o deslocamento da zona de maior velocidade no leito principal para o fundo do canal, à medida que se aumenta a altura relativa.
- Para ambos os casos, o aumento da altura relativa faz com que a velocidade longitudinal no leito de cheia e no leito principal aumentem, causando o efeito contrário na interface. Consequentemente o gradiente de velocidade entre a zona influenciada pelos elementos verticais e as duas subsecções adjacentes aumenta.
- As regiões de tensões laterais τ_{xy} são geradas pelo gradiente de velocidade registado entre a interface e as duas subsecções adjacentes. Pelo que o aumento da altura relativa aumenta as tensões de Reynolds τ_{xy} .
- Em ambos os casos a distribuição das tensões τ_{xy} é semelhante para todas as alturas relativas. Verificando-se no perfil médio em profundidade um pico de tensão positiva no leito de cheia e um pico de tensão negativa na interface.
- A região de tensão negativa tem lugar no interface no caso (ii) e no início de leito principal no caso (i). Sendo que as tensões positivas localizam-se antes do elemento vertical no leito de cheia para ambos os casos.
- A existência de duas regiões de tensão com sinais opostos é uma evidência do obstáculo que os elementos verticais constituem à transferência de quantidade de movimento entre os dois leitos.
- Os resultados obtidos das distribuições de velocidade longitudinal e das tensões laterais τ_{xy} revelam que para todas as alturas relativas o caso (ii) tem maior influência na estrutura de escoamento comparativamente com o caso (i).

6.2. Propostas para futuros desenvolvimentos

A possibilidade de alterar as configurações do canal de secção composta do LNEC, constitui uma grande oportunidade para continuar a desenvolver os resultados experimentais apresentados neste estudo.

Como complemento do trabalho aqui desenvolvido seria importante a confirmação das tendências observadas para escoamentos em torno de leitos de cheia com vegetação marginal, pelo que se recomenda:

- A alteração do regime de escoamento para não uniforme
- Introdução de rugosidade no leito principal
- Alteração do espaçamento dos elementos verticais
- Mudar a localização do alinhamento dos elementos verticais para a zona inclinada do leito principal.

Bibliografia

- Akan, A. O. (2006). *Open Channel Hydraulics*. Elsevier Science & Tech.
- B, M. (2002). *Mecânica dos Fluidos. 6th Edição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Czarnomski, N., Tullos, D., Thomas, R., & Simon, A. (2012). Effects of Vegetation Canopy Density and Bank Angle on Near-Bank Patterns of Turbulence and Reynolds Stresses. *Journal of Hydraulic Engineering, Volume 138*(Issue 11), 974–978.
- Duarte, P. (2011). Influência da rugosidade das planícies de inundação na capacidade de vazão de rios. *Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa*, 94 págs.
- Fernandes, J. (2013). Compound Channel Uniform and Non-Uniform Flows With and Without Vegetation in the Floodplain. *Ph.D. thesis Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.*, 270 págs.
- Fernandes, J. P., & Cruz, C. S. (2011). *Limpeza e Gestão de Linhas de Água Pequeno Guia Prático* (Vol. Volume III). EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A.
- Ferreira, M. T., C. Aguiar, F., & Nogueira, C. (2005). Changes in riparian woods over space and time: Influence of environment and land use Forest Ecology and Management. *Forest Ecology and Management, Volume 212*(Issues 1–3), 145 - 159.
- Gilvear, D., & Wharton, G. (2007). River restoration in the UK: Meeting the dual needs of the European union water framework directive and flood defence. *International Journal of River Basin Management, Volume 5*(Issue 2), 143-154.
- Goring, D., & Nikora, V. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *J. Hydraul. Eng, Volume 128*(Issue 1), 117-126.
- Islam, N. (2001, October). The open approach to flood control: the way to the future in Bangladesh. *Futures, Volume 33*(8–9), 783-802.
- Knight, D., & Demetriou, J. (1983). Flood plain and main channel flow interaction. *Journal of Hydraulic Engineering, Volume 109*(Issue 8), 1073–1092.
- Knight, D., Shiono, K., & Pirt, J. (1989). Prediction of Depth Mean Velocity and Discharge in Natural Rivers with Overbank Flow. *International Conference on Hydraulics and Environmental Modelling of Coastal*, (pp. 19-21). Bradford, England.

- Knight, K. S., & Donald, W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics, Volume 222*, 617-646.
- Krishnappen, B., & Lau, Y. (1986). Turbulence modelling of flood plain flows. *J. Hydr. Engrg., Volume 112*, 251-267.
- Lambert, M., & Myers, W. (1998). Estimating the discharge capacity in straight compound channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, maritime and energy., Volume 130*, 84-94.
- McBride, M., Hession, W. C., Rizzo, D. M., & Thompson, D. M. (n.d.). The influence of riparian vegetation on near-bank turbulence: a flume experiment. *Earth Surf. Process. Landforms, Volume 32*, 2019–2037.
- Myers, R., & Elsayy, E. (1975). Boundary shear in channel with flood plain. *Journal of Hydraulic Engineering, Volume 101*, 933 - 946.
- Myers, W. (1978). Momentum transfer in a compound channel. *Journal of Hydraulic Research, Volume 16*, 139 - 150.
- Myers, W., Lyness, J., & Cassells, J. (2001). Influence of boundary roughness on velocity and discharge in compound river channels. *Journal of Hydraulic Research, Volume 39*(Issue 3), 311-319.
- Naot, D., Nezu, I., & Nakagawa, H. (1996). Hydrodynamic Behavior of Partly Vegetated Open Channels. *Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122*, 625-633.
- Nezu, I., & Nakagawa, H. (1994). Turbulence in open-channel flows. *Journal of Fluid Mechanics, Volume 120*(Issue 10), 1235-1237.
- Nezu, I., & Nakayama, T. (1997). Space-time correlation structures of horizontal coherent vortices in compound open-channel flows by using particle-tracking velocimetry. *Journal of Hydraulic Research, Volume 35*(Issue 2), 191-208.
- Nezu, I., Kouki, O., & Kazuya, I. (1999). Coherent horizontal vortices in compound open channels flows. *Water Resources Publications*, pp. 17-32.
- Pasche, E., & Rouve, M. (1985). Hydrodynamic behavior of partly vegetated open channelsoverbank flow with vegetatively roughened floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering, Volume 111*, 1262 - 1278.
- Pinto, D. (2010). Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta. *Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciência e Tecnologia*, p. 113 págs.
- Prandtl. (1952). Essentials of fluid dynamics. *Blackie, London, UK*.
- Prinos, P., Townsend, R., & Tovoularis, S. (1985). Structure of turbulence in compound channel flow. *J. Hydr. Engrg., Volume 111*(Issue 9), 1246-1261.

- Prooijen, B. v., Booij, R., & Uijttewaai, W. (2000). Measurement and analysis methods of large scale horizontal. *The International Symposia on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. paper 21.3.
- Proust, S., Bousmar, D., Rivière, N., Paquier, A., & Zech, Y. (2010). Energy losses in compound open channels. *Advances in Water Resources*, Volume 33(Issue 1), 1-16.
- Raupach, M. R., & Thorn, A. S. (n.d.). Turbulence in an above plant canopies. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Volume 13.
- Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 174, 935-982.
- Rodrigues, C. (2012). Estudo experimental de escoamentos em rios com vegetação nas margens. *Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa*.
- Sanjou, M., & Nezu, I. (2011). Turbulence structure and concentration exchange property in compound open-channel flows with emergent trees on the floodplain edge. *International Journal of River Basin Management*, pp. 181-193.
- Sanjou, M., Nezu, I., Suzuki, S., & Itai, K. (2010). Turbulence structure of compound open-channel flows with one-line emergent vegetation. *Journal of Hydrodynamics*, Volume 22, 577-581.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*. New York (USA): McGraw-Hill.
- Sellin, R. (1964). A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche*, Volume 7, 793{801.
- Shimizu, Y., & Tsujimoto, T. (1995). Comparison of flood flow structure between compound channel and channel with vegetated zone. *Proc., 25th Congr. of IAHR, Tokyo, Japan*, A-3-4, 97 -104.
- Shimizu, Y., Tsujimoto, T., & Nakagawa, H. (1995). Numerical study on fully developed turbulent flow in vegetated and non vegetated zones in a cross section of open channel. *Proc., Hydr. Engrg.*, Volume 36, 265-272.
- Shiono, K., & Knight, D. (1991). Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 222, 617-646.
- Stephenson, D., & Kolovopoulos. (1990). Effects of momentum transfer in compound channels. *J. Hydr. Engrg.*, Volume 116, 1512 - 1522.
- Sun, X. (2007). Flow characteristics in compound channels with and without vegetation. *Ph.D. thesis, Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, Reino Unido*, 315 págs.

- Sun, X., & Shiono, K. (2009). Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound channel. *Advances in Water Resources, Volume 32*, 430-438.
- Terrier, B., Robinson, S., Shiono, K., Paquier, A., & Ishigaki, T. (2010). Influence of vegetation to boundary shear stress in open channel for overbank flow. *River Flow 2010*. Braunschweig, Germany.
- Tominaga, A., & Nezu, I. (1991). Turbulent Structure in Compound Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, 21-41.
- Tsujimoto, T., & Kitamura, T. (n.d.). Appearance of organized fluctuations in open channel flow with vegetated zone. *KHL Progressive Rep., Hydr. Lab., Kanazawa Univ.*
- Vermaas, D. A., Uijttewaai, W. S., & Hoitink, A. J. (2011). Lateral transfer of streamwise momentum caused by a roughness transition across a shallow channel. *Water Resources Research, Volume 47*(Issue 2).
- Wahl, T. (2003). Discussion of "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data" by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. *J. Hydraul. Eng.*, Volume 129(Issue 6), 484-487.
- Ward, A., Mecklenburg, D., Powell, G., L. Brown, & Jaykaran, A. (2004). Two-Stage Channel Design Procedures. *Self-Sustaining Solutions for Streams, Wetlands, and Watersheds*, (p. 7). St. Paul, Minnesota.
- Wormleaton, P. R., & Hadjipanous, P. (1982). Discharge assessment in compound channel flow. *J. Hydr. Div.*, Volume 108(Issue 9), 975 - 993.
- Yang, K., Cao, S., & Knight, D. (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering, Volume 133*(Issue 2), 148-159.
- Yuen, K. (1989). A study of boundary shear stress, flow resistance and momentum transfer in open channels with simple and compound trapezoidal cross sections. *Ph.D. thesis, University of Birmingham*.